

中航工业首席专家
技术丛书

"十二五"国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

杨 辉 编著

精密超精密加工技术新进展

NEW DEVELOPMENT OF PRECISION AND ULTRA-PRECISION MACHINING TECHNOLOGY

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书　　“十二五”国家重点图书出版规划项目

精密超精密加工技术新进展

杨辉　编著

航空工业出版社

北京

内 容 简 介

本书阐述了精密超精密及微细加工技术的发展历史、作用和最新发展趋势，详细介绍了超精密基础元部件的设计及应用，以及典型超精密加工设备研制中的关键技术，对一些典型超精密加工新工艺的技术特点、特殊材料及复杂型面的精密超精密加工工艺进行了分析，论述了超精密微细加工技术及其在微结构功能表面制造中的应用，以及叶片、喷嘴、复杂壳体类及薄壁结构类等航空典型零件的精密加工工艺及检测技术，研究了误差分析、测头特性及标定等多轴非接触扫描快速检测关键技术，最后介绍了精密超精密加工技术在抗疲劳制造技术中的应用。

本书适合从事精密/超精密制造技术领域工程技术人员、高等院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

精密超精密加工技术新进展 / 杨辉编著. --北京：航空工业出版社，2016.8

（中航工业首席专家技术丛书）

ISBN 978-7-5165-1056-8

Ⅰ.①精… Ⅱ.①杨… Ⅲ.①精密切削②超精加工 Ⅳ.①TG506

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 177504 号

精密超精密加工技术新进展

Jingmi Chaojingmi Jiagong Jishu Xinjinzhan

航空工业出版社出版发行

（北京市朝阳区北苑 2 号院 100012）

发行部电话：010-84936597 010-84936343

北京世汉凌云印刷有限公司印刷 全国各地新华书店经售

2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

开本：787×1092 1/16 印张：29.25 字数：746 千字

印数：1—2000 定价：180.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展作出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。

林左鸣

中国航空工业集团公司董事长

前　言

精密超精密加工技术是指工件通过刀具和精密超精密加工设备联系起来，在各种工艺条件保证下实现零件的精度和表面质量，并能实现指标的定量评价，同时将零件装配形成最终的产品，最终保证产品的性能。精密超精密加工技术的研究内容和范畴主要包括超精密加工机理及方法、超精密检测及控制技术、超精密加工设备技术、超精密加工工艺技术等几方面，并随着科学技术的发展和应用领域的拓展而不断扩展。

现代超精密加工技术经历了一个从非确定性、准确定性到确定性的发展阶段，其中非确定性加工工艺是指加工去除量很小且不确定，需反复进行加工和测量工序，最终迭代完成加工，零件最终的加工精度完全取决于工件的测量精度及操作者的工艺水平。准确性超精密加工技术是指通过计算机控制驻留时间、压力、工件转速等工艺参数确定去除函数，预知准确的材料去除量从而最终控制工件的面形，典型的准确定性超精密加工工艺包括小磨头抛光、磁流变抛光、气囊抛光、离子束抛光、等离子体抛光、应力盘抛光等。确定性超精密加工技术是从20世纪60年代开始发展起来的，该项技术综合利用当代精密机械制造、坐标测量、伺服运动控制、数控、环境控制等一系列尖端科技发展成果，主要包括超精密切削及超精密磨削加工等，加工精度完全取决于超精密机床的精度。发展至今，随着设备精度的提高，特别是随着工艺和检测技术水平的进步，以CCOS（计算机控制光学表面成形技术）为特征的各类超精密抛光等准确定性加工工艺也可以称为确定性加工工艺。

精密超精密加工及微纳加工技术在航空航天武器装备及能源、交通、医疗等高技术民用领域等方面有着广泛的应用。航空发动机叶片的几何精度和表面质量直接影响着航空发动机的工作效率，叶片类零件的精密制造及检测技术代表着国家制造业的核心竞争力，叶片型面及进排气边智能磨削和光学扫描快速精密检测技术代表了当今的制造水平。燃油喷嘴组件是影响发动机性能的微小、复杂、精密结构件之一，喷嘴具有结构精密、技术要求高、制造工艺复杂等特点，喷嘴的关键零件的尺寸结构一致性、尺寸配合精度等特性都对发动机燃烧室的工作性能、燃烧效率及可靠性有直接的影响，增材制造、高一致性精密制造工艺及优化、基于光学测量的快速检测等先进制造技术有效解决了喷嘴制造一致性差、加工效率低、检测能力弱、生产成本控制难的关键问题。航空薄壁件加工过程中的刚度仿真及主动补偿技术提高了弱刚度构件的加工精度及效率。复杂壳体类零件的高效集成数控加工技术解决了深小孔的高效加工、多类型孔快速测量以及深小孔交叉处去毛刺等难题，保证了加工质量和效率。抗疲劳制造技术是在控制工件表面完整性的基础上，以疲劳性能为主要判据和提高疲劳强度的先进制造技术，其基础理论是无应力集中，本质是构筑抗疲劳表面变质层。基于表面完整性的精密超精密加工工艺、精密确定性强化设备及工艺、材料及构件疲劳寿命的测试设备等为抗疲劳制造技术的发展提供了技术支撑。

自由曲面光学元件凭借其传统光学元件无可比拟的优越光学性能，例如成像质量高、照明均匀性和能量的传输效率高、光学系统体积小重量轻等，已应用于国防、航空航天、太空遥测等重要领域，并成为了光电及通信的关键部件。多轴超精密加工设备、快速刀具伺服加工技术、慢拖板伺服加工技术等为光学自由曲面的加工提供了新的加工工艺。微结构功能表面具有特定的拓扑形状，其表面微结构具有纹理结构规则、高深宽比、几何特性确定、表面质量高等特点，这些表面微结构使得元件具有某些特定的功能，包括物理、化学及光学性能等，在航空、兵器及能源、照明等民用行业得到广泛应用。原有的 MEMS 等微纳制造工艺无论从精度、表面质量或材料的适应性等方面都无法满足设计及应用要求，随着超精密加工设备和工艺的发展，上述问题将迎刃而解。随着产品要求的提高，某些零部件整个制造过程或整个产品的研制过程都涵盖了“超精密”的概念。如随着高精度惯性传感器结构的微小型化、工作部位尺寸及形位精度的亚微米化，刀具的小型化和加工进给量的微量化、非接触面形和尺寸测量显微化等一系列技术难题对传统精密超精密加工技术提出严峻挑战，因此需建立系统的超精密微细加工设备及工艺、微细测量、组装工艺技术平台，以满足微细超精密加工、装配和检测的需求，这样就需要实现由单工序的超精密加工向全过程的超精密制造的演变。

智能制造技术是“中国制造 2025”的核心，而智能制造技术的核心是：动态感知、实时处理、自主决策、精准执行动态感知及精准执行。所谓动态感知就是通过各类传感及测量系统对制造过程和状态进行检测和监测，这就是精密测量测试；精准执行必须有执行元部件，比如高精度的直线运动机构、回转运动机构、运动控制系统等，这就是精密元部件、精密装备，这一切均与精密超精密加工和检测技术密切相关。智能制造技术是一种先进的生产模式，需要材料、制造、检测、试验等基础技术支撑，离开这些基础技术，智能制造也是空谈。

目前，国内研发的超精密加工设备中检测及驱动部件还只能从国外引进，设备整体技术指标与国外同期先进水平还存在一定差距，尤其在工程化、可靠性等方面更为明显；国外设备依然占据大部分市场份额，但某些专用超精密加工设备已经取代了国外的同类设备。随着超精密加工技术向着高效、极致等方向发展，超精密检测及驱动部件的研发、复杂光学曲面的超精密加工与检测技术以及超精密加工新机理、新方法、新工艺的研究等成为亟待突破的关键技术，同时需进一步加快国产超精密加工设备及工艺的工程化应用进程。

北京航空精密机械研究所在精密超精密加工技术与设备、惯导测试与运动仿真技术与设备、数控三坐标测量机技术与设备、精密检测技术与设备、环境试验技术与设备、特种加工技术与设备、工艺过程自动化技术与设备以及航空发动机零部件制造与测试技术等方面进行了大量卓有成效的研究开发工作，具有光学、机械、电子自动控制、液压、测试和计算机应用等多专业的综合性技术开发能力，技术实力雄厚，工艺测试手段齐全。北京航空精密机械研究所是国内最早从事超精密加工技术研究的单位之一，先后自行研制了具有自主知识产权的系列化非球面超精密多轴切削加工设备、超精密磨床、圆弧刃金刚石刀具刃磨设备、超精密研磨抛光设备等超精密加工设备，并进行了超精密切削、磨削及研磨抛光等超精密加工工艺，精密数控加工工艺等研究，在超精密基础元部件及设备集成技术、超精密加工工艺研究，复杂壳体、薄壁结构件、难加工材料以及精密偶件等航空零部件的

精密加工及检测方面等方面具有较强的实力，相关科研成果已在航空、航天、兵器等领域得到了推广应用。近年来在以喷嘴、叶片等为代表的航空发动机关键件的精密加工及检测技术进行了大量研究工作，研制成功了复杂面形及微结构特征多轴非接触扫描快速精密检测设备，提高了测量效率及精度；进行了高强度合金材料的基于表面完整性的超精密磨削及抛光工艺研究并应用于航空发动机轴承的生产制造，并研制成功了疲劳寿命精密测试试验设备、发动机轴承构件强化设备等，为航空抗疲劳制造技术的研究和应用提供了技术支撑。

全书由北京航空精密机械研究所精密制造技术航空科技重点实验室组织编写，哈尔滨工业大学、天津大学等高校的老师也参与了其中部分章节的编写工作。其中北京航空精密机械研究所的房建国研究员负责编写了第2章（2.1、2.2）、第6章（6.3）、第7章（7.1）、第8章，郑会龙研究员负责编写了第7章（7.2、7.3），庞长涛研究员负责编写了第9章（9.3、9.5），张彬高级工程师负责编写了第2章（2.6、2.8）。哈尔滨工业大学的王波教授负责编写了第3章（3.5）、第4章（4.3）、第6章（6.4.5），孙涛教授负责编写了第6章（6.4.1、6.4.2）。天津大学房丰洲教授负责编写第5章（5.1）、第6章（6.4.4）。本书其余章节均由杨辉负责编写。

由于精密超精密加工及检测技术在不断发展，特别是新原理、新方法、新设备、新工艺等的出现尚需要大量的试验研究和深入的理论分析，在新领域的应用也仍需进一步验证，因此本书尚有诸多不足和可能的错误之处，敬请同行专家批评指正，以共同提高我国精密超精密加工技术的水平以及推广应用。

北京航空精密机械研究所郁韶琛、张建明、谭本能、胡成海、刘勇、刘祎、杨肖芳、张谭、鲍龙祥、王岩、张利鹏、董璞、毕超、丁军伟、李迪、杜海涛、尹伊纶等对书稿进行了校对和审阅工作，此外本书在撰写和出版过程中得到了精密制造技术航空重点实验室全体成员以及北京航空精密机械研究所领导和同事的支持和帮助，在此一并表示感谢！

编者

2015年10月1日

目　　录

第4章　超精密加工新工艺 ………………………………（120）

第5章　特殊材料及复杂形状零件的超精密加工技术 …………（196）

第1章　精密超精密加工技术的发展与展望

1.1　超精密加工技术的概念与内涵

1.1.1　概述

制造技术的起源从一定意义上可以追溯到原始社会，当原始人类学会了制作具有一定形状且锋利的石器工具时，石块间的相互敲击和刮擦可以认为是最原始的手工研磨加工工艺（见图1－1（a））；到了青铜器时代后人类制作了各类表面光滑的铜镜（见图1－1（b）），这种制作方式与现代的研磨及抛光工艺更加接近，但是到了近代才出现了真正意义上的精密加工，最典型的例子就是镗床的发明。1769年瓦特取得实用蒸汽机专利后，汽缸的加工精度就成了蒸汽机能否提高效率并得到实际应用的关键问题。1774年英国人威尔金森发明了炮筒镗床（见图1－1（c）），可用于加工瓦特蒸汽机的汽缸体。1776年他又制造了一台更为精确的汽缸镗床，加工直径为75in[①] 的汽缸内孔，误差还不到一个硬币的厚度。正是由于加工精度的提高才促使了蒸汽机的大规模应用，从而推动了第一次工业革命的发展。



（a）原始人制作简单石器工具


（b）抛光的青铜镜

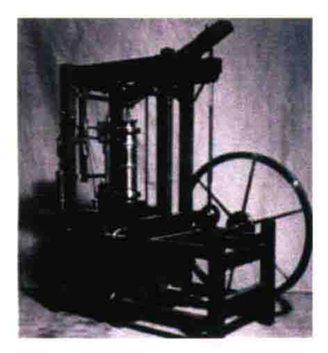

（c）威尔金森炮筒镗床

图1－1　精密加工的历史

目前精密超精密加工所涉及的主要技术指标包括加工精度（尺寸公差和形位误差）、表面质量（表面粗糙度等）。关于精密超精密加工的具体含义目前还没有一个准确的定义，表1－1中列出的只是目前公认的指标。随着技术的发展，超精密加工技术的指标也在不断丰富，对于一些特殊零件例如光学反射镜的超精密切削加工，反射率等指标目前也被列入了衡量超精密加工水平的技术指标。近年来发展起来的表面完整性制造技术及抗疲劳制造技术对精密超精密加工技术提出了新的要求，表面完整性的技术指标也已经成为衡量制造技术水平高低的重要标志。

---

① 1in＝2.54cm。

表 1－1　目前精密超精密加工技术的技术指标范围

精度等级	尺寸精度/μm	表面粗糙度 Ra/μm	加工技术
微米级	1～10	0.4～0.04	精密加工
亚微米级	1～0.01	0.04～0.005	超精密加工
纳米级	<0.01	<0.005	纳米加工

下面举一个通俗的例子可以更容易理解“精密”的概念或精密超精密加工技术的含义。首先说三个词：面团、锅炉、石头，再用这三个词造句：“钢铁如面团”“人如锅炉”“灰尘如石头”。看似三对矛盾的词语却发生了联系，从“精密”这个角度来看，却形象地反映了精密加工中的三个重要因素，即刚度、温度以及洁净度。刚度再高的结构件受力时从微观上看都会发生变形从而影响超精密加工的精度；37℃体温的一个人犹如一台锅炉会对环境温度产生影响，从而影响超精密加工设备的性能和加工精度；微米级的灰尘颗粒犹如巨大的石头会对超精密加工环境造成污染，从而损坏零件的表面质量。

精密超精密加工等制造技术随着时代的发展在不断进步，从远古的人类用敲击和研磨的方法制造出第一件石器工具开始，制造技术的进步就一直伴随着人类文明的进步。到了第一次工业革命以后，制造技术已成为推动社会进步的发动机，工业化制造的各种产品极大地改变着人类的生活。到了现代，制造技术更获得了飞速的发展，精密超精密加工技术正是在这种背景下获得了快速发展。在第一次工业革命时，机械零件的制造精度是毫米级（mm），而现在已经很容易达到微米级（μm）及亚微米级。在两百年间，机械加工精度提高了三个数量级。当前普通加工、精密加工和超精密加工的前沿已分别趋近 1μm、0.01μm 和 1nm（纳米）。超精密加工正在逼近“加工精度的极限”——原子尺度，如图 1－2 所示。在传统的超精密机械加工精度不断提高的同时，人们还发展了各种新的精密

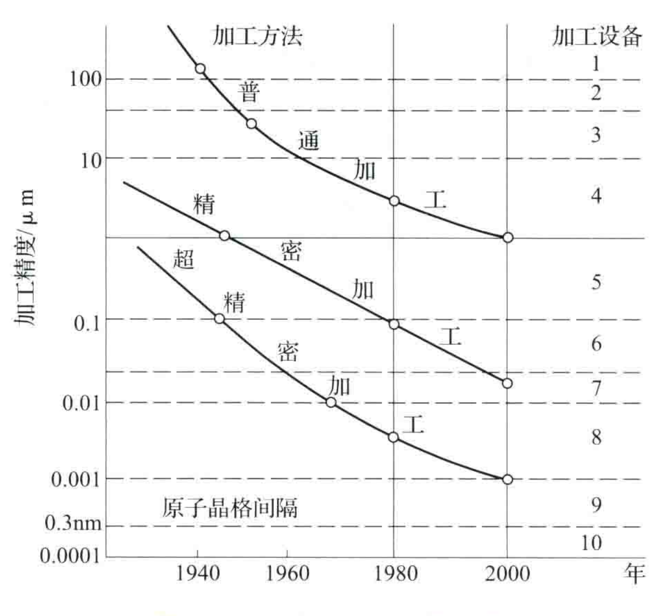


图 1－2　机械加工精度及发展

1—车、铣；2—磨；3—CNC 机床；4—研磨、工具磨；5—光学磨，金刚石车、磨；6—金刚石超精车、ELID 磨削、电解加工；7—衍射光栅刻线机；8—电子束、离子束、X 射线；9—分子束生长、离子注入；10—扫描隧道技术

超精密特种加工技术，例如精密电火花加工技术、精密激光加工技术、精密电解加工技术、以精密电铸为基础的 LIGA 工艺制造技术、精密增材制造技术（又称 3D 打印技术）、光刻制造技术、纳米制造技术等。超精密检测技术是超精密加工技术的伴侣，只有检测得出来才能加工得出来，因此两者的发展既互相制约也互相促进。所有这些为了实现产品或零件高的尺寸精度或特殊结构而采取的加工技术和检测技术统称为精密超精密制造技术。

1.1.2　超精密加工技术的研究范围

随着科学技术的发展，超精密加工技术的研究内容和范围不断扩展，主要包括超精密加工机理及方法、超精密检测及控制技术、超精密加工设备技术、超精密加工工艺技术等几方面，如图 1－3 所示为超精密加工技术体系简图。

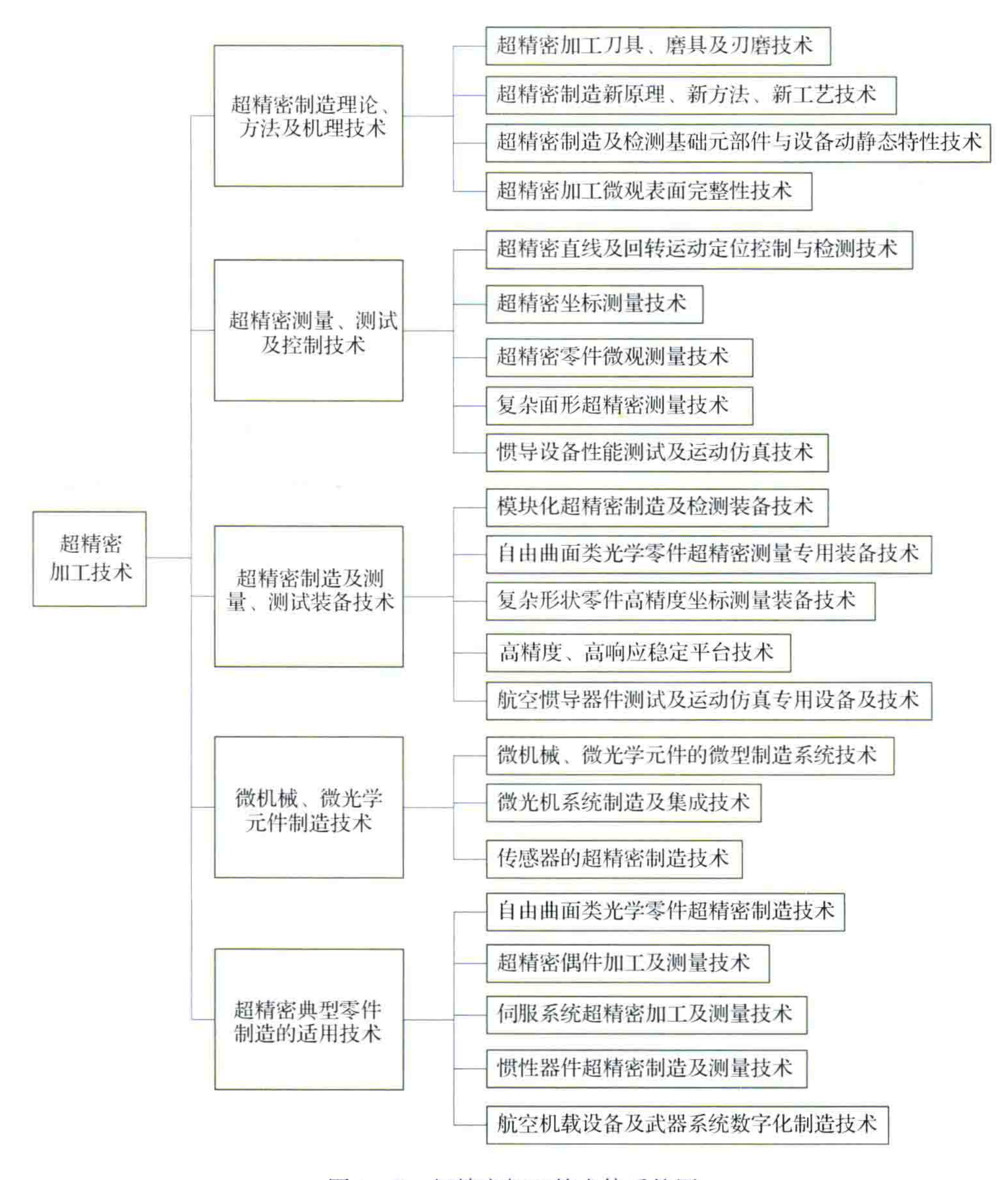
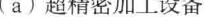


图 1－3　超精密加工技术体系简图

在影响现代超精密加工技术发展的诸因素中，超精密加工设备的水平是首要因素，超精密加工机床的研制多年来一直是超精密加工技术领域的研究热点，无论是确定性超精密加工设备及准确定性超精密加工设备，国内外近年都得到了长足的进步；超精密加工工艺是实现超精密零件加工的方法和途径，主要包括超精密加工工艺参数优化、超精密加工刀具技术、超精密环境控制技术等；超精密测量测试技术是评价超精密加工技术水平高低的手段，超精密加工的零件具有精度高、形状复杂以及结构特征尺寸小等特点，对超精密测量技术提出了更高的要求，此外在位、在线检测技术在超精密加工及检测领域也得到了广泛应用，超精密加工及检测设备精度提高到一定程度后如果要求更高，则会急剧增加成本或者根本无法实现，所以通过误差在线测量及补偿技术可以有效地解决上述难题；超精密装配技术近年来也得到了重视，例如惯性传感器不仅零件的加工精度高，同时要求产品最终精度具有稳定性及保持性，这就需要在装配过程中需要控制零件之间的装配精度及装配应力。




（a）超精密加工设备



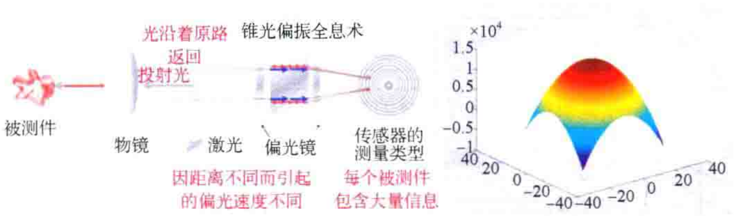

超精密切削技术　超精密磨削技术　超精密研抛技术

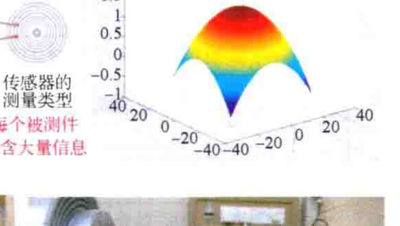


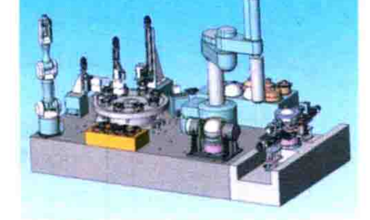


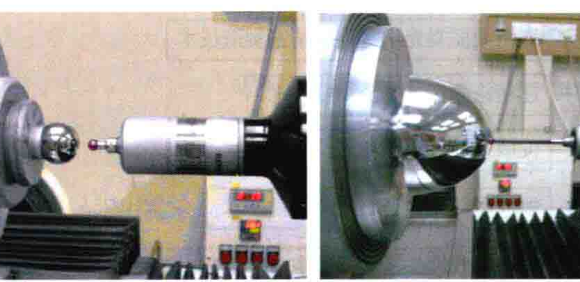
超精密微细加工技术　刀具　环境控制技术

（b）超精密加工工艺












（c）超精密测量及检测技术

（d）超精密装配技术

图 1－4　超精密加工技术研究范畴

综上所述，所谓精密超精密加工技术是指工件通过刀具与加工设备联系起来，在各种条件保证下实现零件的精度和表面质量，并能实现指标的定量评价，同时将零件装配形成最终的产品，最终保证产品的性能，如图1－5所示。需要指出的是，近年来有的零部件光靠尺寸精度、形位精度以及表面质量等指标已经无法表达设计要求，于是在一些特殊场合设计时增加了零件的性能指标和产品的功能指标，如激光陀螺反射镜基片属于超光滑表面，除了表面粗糙度指标外，还增加了反射率的指标。

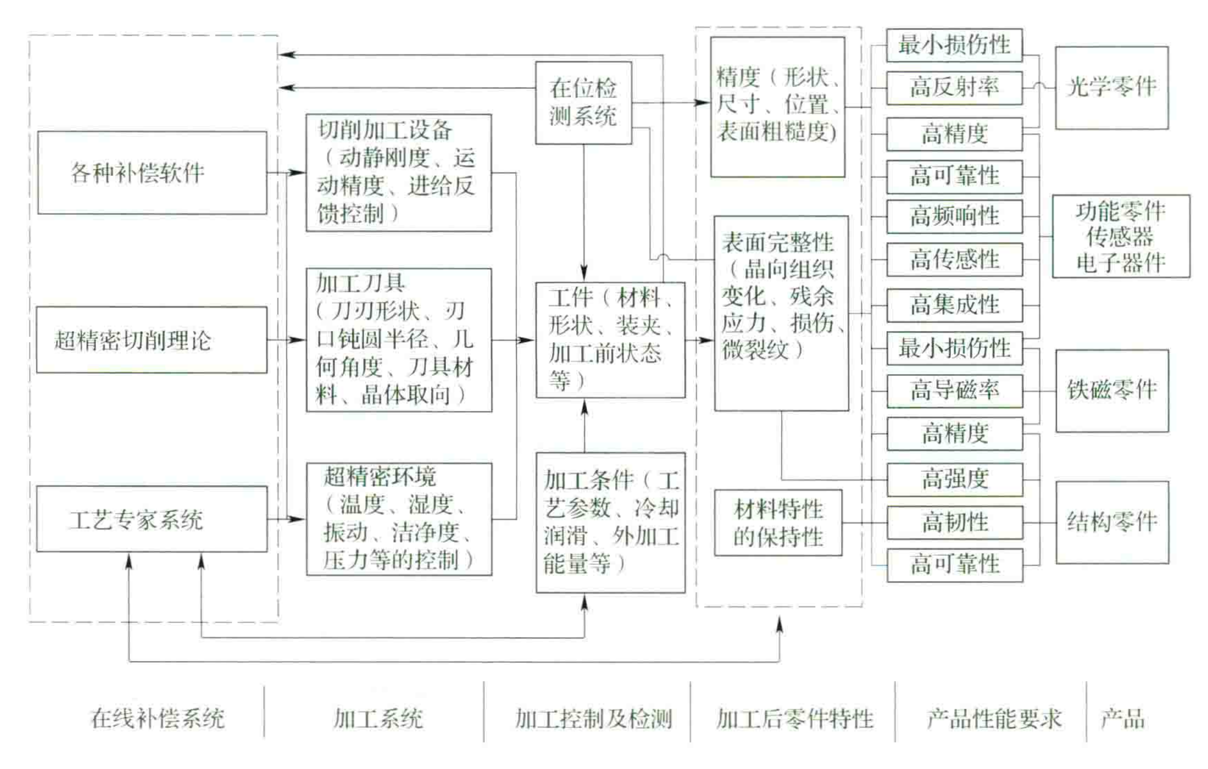


图1－5　超精密加工技术的基本研究内容

1.2　超精密加工技术的发展历史

1.2.1　超精密加工技术的三种方式

1.2.1.1　非确定性超精密加工

现代超精密加工技术是从20世纪60年代开始研究和发展的，之前有许多高精度的光学零件（如天文望远镜的镜片等）则是通过传统的研磨抛光工艺进行加工。传统的光学系统因设计、计算和加工、制造技术所限，其结构和元件形状都较简单，光学元件面形通常为平面、球面。传统的光学元件加工时，采用大数、无规则轨迹控制和均化效应等研磨抛光工艺，配合零件型面的检测，可获得良好的超精密加工效果。这里零件的加工精度依赖的是工艺方法，而不苛求加工机床本身的精度，低机械精度的加工机床仍可达到高的光学元件加工精度效果。由于采用上述加工工艺时，材料每次的去除量是不确定的，通常被称为“非确定性”超精密加工技术（见图1－6（a））。

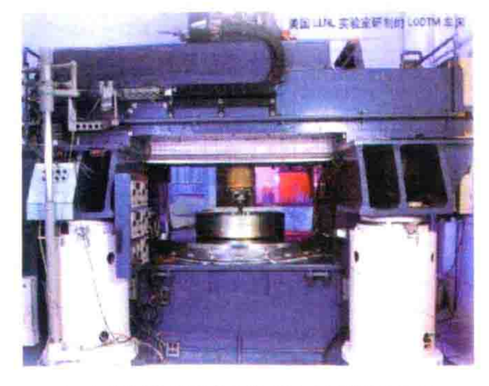
非确定性超精密加工技术具有以下特点：



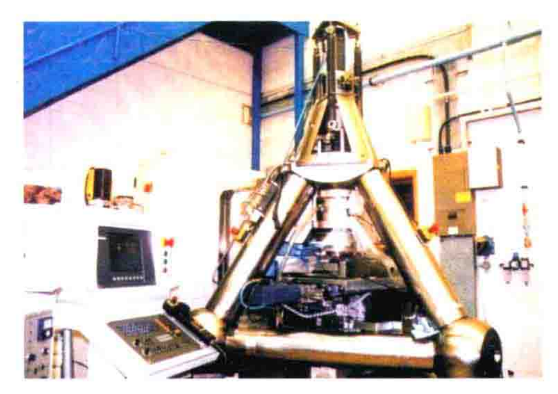
（a）人工研磨（非确定性超精密加工）



（b）小磨头抛光（准确定性超精密加工）



（c）超精密车削（确定性超精密加工）



（d）超精密磨削（确定性超精密加工）

图 1－6　超精密加工技术的三种方式

①加工设备精度要求不高，只起到提供工件或工具运动的作用；或者加工过程完全是通过操作者的手工操作完成，操作者的工艺水平是工件最终的加工精度的关键因素之一。

②加工去除量很小且不确定，需反复进行加工和测量工序，最终迭代完成加工，零件最终的加工精度完全取决于工件的测量精度。

③适合玻璃、陶瓷等硬脆材料及简单形状（球面、平面等）零件的加工。

④加工成本高、周期长，可达到较高的加工精度。

目前这种加工工艺仍然在一定场合得到应用，如高精度铸铁测量平板的刮研、花岗石平台的研磨、标准球的研磨等。

1.2.1.2　准确定性超精密加工

随着现代计算机控制技术的发展，通过对传统的非确定性超精密加工技术加以改进，如在加工过程中对研抛工具形状、工件支撑状态以及加工参数等进行实时自适应控制，从而提高了加工精度和效率，发展成为“准确定性”超精密加工技术，这种方式是目前光学元件的主要加工方式。其中典型的准确定性超精密加工工艺包括小磨头抛光、磁流变抛光、气囊抛光、离子束抛光、应力盘抛光等，这些超精密加工工艺可以通过控制驻留时间、压力、工件转速等参数确定去除函数，预知准确的材料去除量从而最终控制工件的面形（见图 1－6（b））。

与非确定性超精密加工技术相比，准确定性超精密加工技术具有以下特点：

①对加工设备精度要求较高：由于加工过程中需要控制加工点和工具的相对位置精度，所以要求加工设备具有较高的重复定位精度，一般要求在 0.01mm 左右即可满足使用要求；

②由于通过理论计算或试验可以得到加工过程的去除函数，所以较为准确地控制每次加工的去除量，通过对去除函数收敛性的分析仿真可以大大缩短加工周期，这样不仅提高了加工精度，同时也缩短了加工效率、降低了生产成本；

③可以通过加工设备复杂的多轴运动控制工具的轨迹，进行包括非球面、自由曲面等复杂曲面超精密加工。

1.2.1.3　确定性超精密加工

与上述两种加工工艺相比，从20世纪60年代开始发展起来的超精密切削及超精密磨削加工工艺被称为“确定性”超精密加工技术，加工精度完全取决于超精密机床的精度。该项技术综合利用当代精密机械制造、坐标测量、伺服运动控制、数控、环境控制等一系列尖端科技发展成果，其技术核心是超精密加工机床。这类超精密加工机床的特点是可控制刀具（如金刚石刀具、砂轮等）以极高精度的空间运动轨迹直接加工成形具有光学镜面效果的产品。具有这种性能的机床不仅使加工效率得到了极大的提高，还可实现传统方法难以加工处理的金属、光学晶体等材料，以及非球面、自由曲面等复杂面形的超精密加工。

超精密加工机床的高确定性取决于对影响精度性能的各环节因数的控制。这些控制品质常常要求达到当代科技的极限：如机床运动部件（导轨、主轴等）极高的运动精度和可控性（如摩擦、阻尼品质）；机床坐标测量系统极高的分辨率、测量精度和稳定性；运动伺服控制系统极高的动、静态加工轨迹跟踪和定位控制精度等。此外，还要求数控系统具有高性能的多轴实时控制及数据处理能力；机床本体的高刚性、高稳定性和优良的振动阻尼；为了防止环境振动和加工中机床姿态微小变化的影响，机床还需安装隔振、精密自动水平调整机构等。环境因数对超精密加工影响巨大。特别是大型超精密加工机床环境控制极为严苛：除了控制地基振动，对机床本体液体温度控制，环境空气流场、温度控制，以现有的科技手段，无论要求多高都不为过，甚至声场及任何可能对机床状态产生微小扰动的因数都要进行严格控制（见图1-6（c）和图1-6（d））。

确定性超精密加工技术有如下主要特点：

①对超精密加工机床精度要求极高，需要严格控制影响精度的各环节因素；

②主要用于有色金属、红外材料等光学零件的超精密切削，黑色金属及其他硬脆材料的超精密磨削；

③加工效率高。

1.2.2　现代超精密加工技术的发展现状

20世纪60年代初期随着航天技术的发展，超精密加工技术在美国首先被提出并由于得到了政府和军方的财政支持而迅速发展。到了20世纪70年代，日本也成立了超精密加工技术委员会并制定了相应发展规划，将该技术列入高新技术产业，经过多年的发展，使得日本在民用光学、电子及信息产品等产业处于世界领先地位。

近年美国开始实施了“微米和纳米级技术”国家关键技术计划，国防部成立了特别委员会，统一协调研究工作。美国目前至少有30多家公司研制和生产各类超精密加工机床，劳伦斯-利弗莫尔国家实验室（Lawrence - Livemore National Laboratory，简称LLNL）、摩尔（Moore）公司等在国际超精密加工技术领域久负盛名。同时利用这些超精密加工设

备进行了陶瓷、硬质合金、玻璃和塑料等材料的不同形状和种类零件的超精密加工，用于航空、航天、半导体、能源、医疗器械等行业。日本现有20多家超精密加工机床研制公司，重点开发民用产品所需的超精密加工设备，并成批生产了多品种商品化的超精密加工机床。日本在相机、电视、复印机、投影仪等民用光学行业的快速发展与其先进的超精密加工技术有着直接的关系。英国从20世纪60年代起开始研究超精密加工技术，现已成立了国家纳米技术战略委员会，正在执行国家纳米技术研究计划，德国和瑞士也以生产精密加工设备闻名于世。1992年后，欧洲实施了一系列的联合研究与发展计划，加强和推动了精密超精密加工技术的发展。

1.2.2.1 超精密加工设备的发展

各国对超精密加工设备的研发来源于航空航天等领域的需求，例如美国劳伦斯－利弗莫尔国家实验室（LLNL）1984年研制的大型立式光学金刚石超精密车床（Large Optical Diamond Turning Machine，简称LODTM）主要用于美国国家航空航天局（NASA）SPARCLE初级抛物面反射镜的加工，该机床加工范围为ϕ1500mm×500mm，加工精度可达0.028μm（rms，均方根值）、表面粗糙度3.59nm（rms），到目前为止还是世界上精度最高的大型超精密加工设备，如图1－7所示。

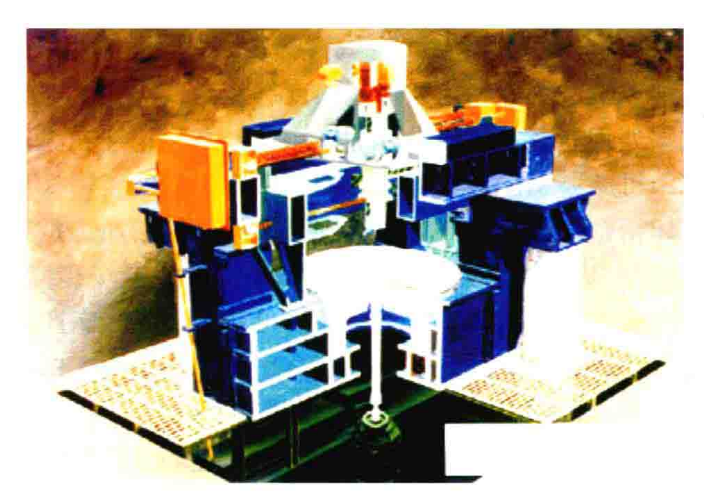






图1－7　LODTM超精密车床及加工的工件

美国柯达公司与英国大学合作研制了OAGM 2500离轴光学镜面超精密磨床（见图1－8），该设备的加工范围为ϕ2500mm×800mm，可达到1μm的平面加工精度和2.5μm的离轴非球面加工精度，是目前世界上最大的超精密磨床。

2006年洛克斯汉姆精度公司和克兰菲尔德（Cranfield）大学研制出名为Big OptiX（BOX®）的新一代大型超精密磨床，该机床制造的应用背景就在于欧洲超大望远镜所需的镜片加工。当时是原型机床，至今仍在进行改进并向商业化推进。该磨床采用了一种新的设计理念，即优先考虑大载荷条件下磨粒切入深度的动态控制需要，使得在对大尺寸玻璃、陶瓷部件的复杂形状、低陡度自由曲面的高精度磨削过程中，能获得极低的亚表面损伤。该机床结构如图1－9所示，设计中尽量减少结构环中运动部件的重量和结合部的数目，以机床的一阶固有频率高于工作频率的3倍为设计目标，采用少轴驱动（三轴）来实现需要四轴或五轴驱动机床加工自由曲面的方案来提高静、动态刚度并获得高的材料去除率。该机床的直线

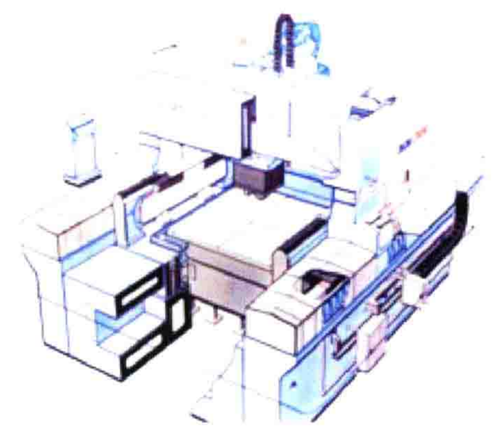



图1-8 OAGM 2500超精密磨床




图1-9 BOX® 超精密自由曲面磨削机床

运动分辨率为1nm，旋转运动分辨率为0.01″，一阶固有频率高于100Hz，可用于加工1～2m直径的自由曲面光学玻璃或陶瓷材料，加工面形精度达1μm。

除了上述代表最高水平的超精密加工设备外，随着超精密加工技术从军事应用向民用行业的转移，从20个世纪90年代开始，就有商品化的超精密加工设备在市场上都可以订购。从最早的一些英国公司到后来的美国摩尔公司等，有不同种类、不同型号的超精密加工设备可供选择，如图1-10所示。这些设备从最初对国内严格禁运，到目前对特定的对象限制，价格从最初的一千多万美元降到目前的三四百万美元，主要原因就是国内超精密加工技术的崛起和发展。

除了欧美的超精密加工设备，日本在超精密加工技术领域也很先进，重点开发民用产品所需的超精密加工设备，并在相机、电视、复印机、投影仪等平板显示、光学成像和办公自动化等行业得到了很好的应用，但是由于历史原因，国内很少见到日本的超精密加工设备。20世纪80年代由于日本东芝公司出售给苏联精密数控铣床用于加工潜水艇的叶片，加工精度的提高大大降低了噪声，结果东芝公司受到了日本政府的制裁，这就是所谓的“东芝事件”。日本三井精机收购了瑞士DIXI精密镗床部后，原来国内可以引进的DIXI精密镗床也受到了限制。

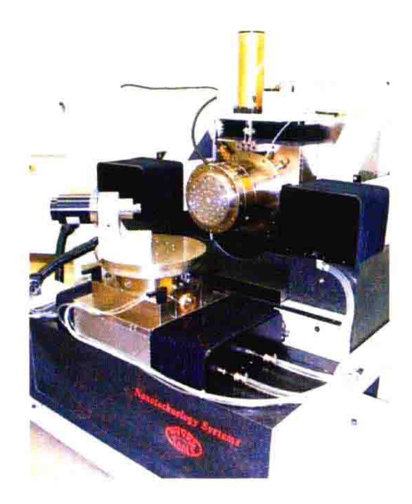
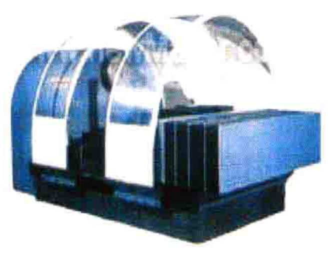



图 1－10　商品化的多轴超精密加工设备

国内真正系统提出超精密加工技术的概念是从 20 世纪 80 年代到 90 年代初，由于航空、航天等军工行业的发展对零部件的加工精度和表面质量都提出了更高的要求，这些军工行业投入资金支持行业内的研究所和高校开始进行超精密加工技术基础研究。由于当时超精密加工技术属于军用技术，无论从设备还是工艺等方面国外都实施了技术封锁，所以国内超精密加工技术的开展基本都是从超精密加工设备的研究开始。由于组成超精密加工设备的基础是超精密元部件，包括空气静压主轴及导轨、液体静压主轴及导轨等，所以各家单位也正是以超精密基础元部件及超精密切削加工用的天然金刚石刀具等为突破口，并很快就取得了一些进展。哈尔滨工业大学、北京航空精密机械研究所等单位陆续研制了超精密主轴及导轨等元部件，并进行了天然金刚石超精密切削刀具刃磨机理及工艺研究，同时陆续搭建了一些结构功能简单的超精密车床、超精密镗床等超精密加工设备开始进行超精密切削工艺试验（见图 1－11）。



（a）亚微米超精密车床
（哈尔滨工业大学2000年）



（b）卧式超精密车床
（北京机床所2002年）



（c）非球面超精密复合加工机床
（北京航空精密机械研究所2001年）

图 1－11　国内研制的超精密加工机床

国内超精密加工技术发展的里程碑是非球面曲面超精密加工设备的研制成功。非球面光学零件由于具有独特的光学特性在航空、航天、兵器以及民用光学等行业开始得到应用，从而简化了产品结构并提高了产品的性能。当时加工设备只有美国、日本及西欧等少数国家能够生产，国内引进受到严格限制而且价格昂贵，国家从“九五”开始投入人力物

力支持研发超精密加工设备。到“九五”末期，北京航空精密机械研究所、哈尔滨工业大学、北京兴华机械厂、国防科技大学等单位陆续研制成功代表当时国内超精密加工最高技术水平的非球面超精密切削加工设备，打破了国外的技术封锁。之后其他各类超精密加工设备，如超精密磨削设备、计算机数控小磨头抛光设备、磁流变抛光设备、离子束抛光设备、大口径非球面超精密切削加工设备（如图1-12所示）、自由曲面多轴超精密加工设备、压印模辊超精密加工设备等也陆续研制成功，缩小了超精密加工技术国内外的差距。同时由于有了超精密加工设备的支撑，在超精密加工工艺方面也有了很大进展，如砂轮电解在线修整（Electrolytic In-Process Dressing，简称ELID）超精密镜面磨削工艺、磁流变抛光工艺、大径光学透镜及反射镜超精密研抛及测量工艺、自由曲面的超精密加工及测量工艺、光学薄膜模辊超精密加工工艺，超精密加工技术的应用领域也从军工行业扩展到民用行业。



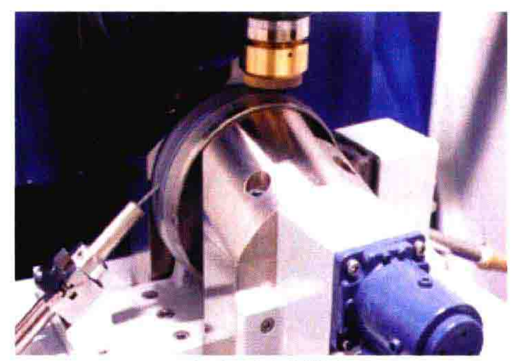
图1-12 国内第一台大型（ϕ1000mm）光学元件金刚石超精密切削加工设备（LODTM）

1.2.2.2 超精密加工机理及超精密加工工艺的发展

随着技术的进步、材料的改进以及对复杂结构的需求，超精密切削工艺、超精密磨削工艺以及超精密研磨抛光工艺等传统的超精密加工工艺也不断发展，主要有以下几方面。

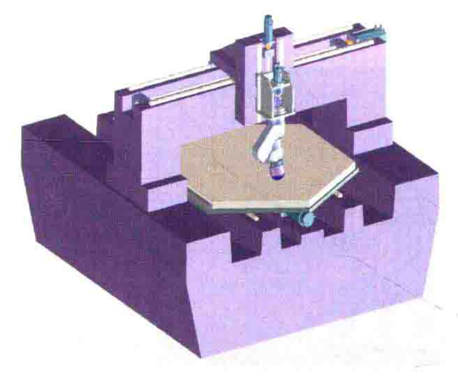
（1）新原理在超精密加工技术方面的应用

例如磁流变抛光是利用磁流变液在磁场的作用下会变成具有一定硬度和强度的固态，利用此作为工具可进行光学镜面的抛光，其硬度和形状都可通过磁场分布及强度调整，实现可控柔体的超精密加工（见图1-13（a））；应力盘抛光或称能动盘抛光是指在抛光工具盘上分布若干个可以单独控制的作用点，使其局部变形改变抛光工具的形状从而控制抛光面形（见图1-13（b））；进动气囊抛光是指抛光工具采用内部充气的柔性气囊，可以通过改变气囊的压力来改变工具与工件的接触状态，同时辅助以进动方式（陀螺的运动方式），通过复杂的轨迹运动完成抛光（见图1-13（c））；离子束加工是在真空环境下通过物理碰撞的方式去除，被加速的离子与工件表面原子直接碰撞传递能量使工件表面原子逸出，实现材料去除，此类设备昂贵，其优点是非接触、无应力、无污染；大气低温等离子体抛光则是近年来发展的一项新技术，可以在大气环境下通过等离子体化学蒸发实现材料的高效去除（见图1-13（d））。


（a）磁流变抛光



（b）应力盘抛光


（c）气囊抛光



HLIOS 1200-3

（d）大气低温等离子抛光

图 1-13　新原理的超精密抛光工艺

这几种工艺的特点是去除函数确定可控，具有加工效率高、精度高等特点，适用于大型光学镜面的超精密加工。

（2）材料性能方面的改进或者加工工艺的改变对超精密加工工艺提出了新要求

黑色金属由于碳的亲和作用一直被认为无法采用金刚石进行超精密切削加工，所以各种模具基本采用超精密磨削方式进行加工，多年来人们也一直在研究黑色金属的超精密切削加工工艺。例如采用低温流体（液氮或干冰等）对切削区域的冷却降低切削温度，实现黑色金属的单点金刚石超精密切削；利用振动辅助切削加工工艺减小了切削力、降低了切削温度，提高了切削刀具寿命；通过被加工材料表面改性，使钢铁材料中铁等过渡金属元素原子与渗入元素形成了化合物，从而抑制了其对金刚石石墨化的催化作用，在黑色金属的超精密切削加工中取得了较好的效果；同时化学热处理工艺快捷、成本低而且渗氮层提高了工件表面的耐腐蚀性。

为了提高航空发动机轴承的疲劳寿命，对轴承材料的热处理或表面处理工艺、超精密加工工艺提出了新的要求。例如轴承材料高强度钢 M50NiL，采用表面渗氮工艺后硬度超过 70HRC，由于其加工表面完整性指标（表面粗糙度、残余应力、表层显微硬度等）直接影响轴承的疲劳强度及使用寿命，采用超精密磨削和抛光工艺可以有效地提高轴承滚动体钢球以及轴承内外套圈滚道的加工精度和表面质量，从而大幅提高了轴承的使用寿命。

（3）具有复杂形状及特征零件的需求促进了超精密加工工艺技术的发展

光学系统中采用非球面替代球面作为光学元件不仅可以简化系统结构、减小重量，同

时也可提高成像质量。非球面超精密加工及检测技术在20世纪90年代还是一项先进的加工技术，当时国外设备对国内还实施禁运。“九五”期间国家投入人力物力开始了非球面超精密加工设备及工艺的研究，到2000年前后国内多家单位陆续研发成功了非球面超精密车床，目前该项技术已经成熟。自由曲面与非球面相比优点更加突出，如可以用一片自由曲面镜替代整套光学显示系统，如图1-14所示。目前在国内光学自由曲面的超精密加工及检测技术正在进行，还有许多亟待解决的难题。

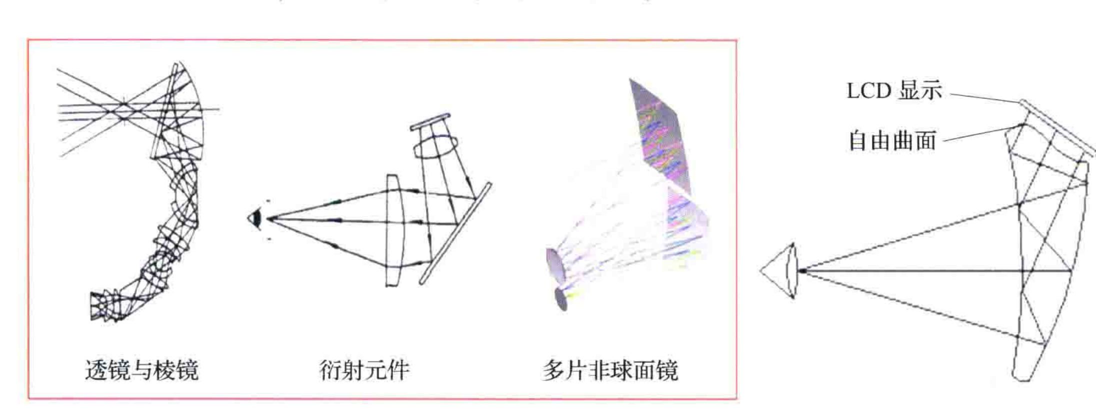
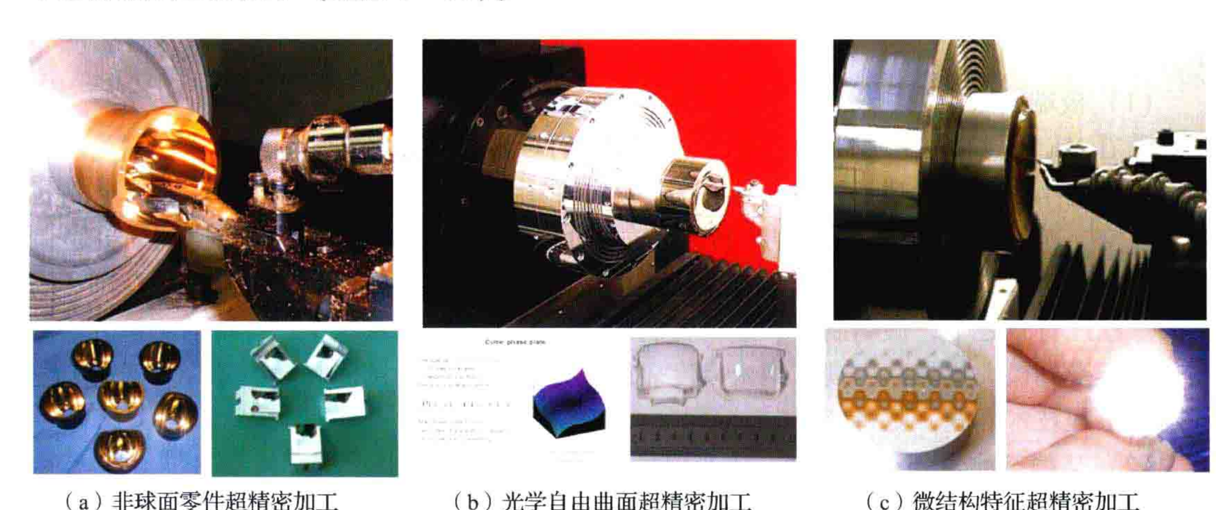


图1-14 自由曲面棱镜在显示系统中的应用

微结构功能表面是指具有特定的拓扑形状，结构尺寸一般为10~100μm，面形精度小于0.1μm，其表面微结构具有纹理结构规则、高深宽比、几何特性确定等特点，如凹槽阵列、微透镜阵列、金字塔阵列结构等，这些表面微结构使得元件具有某些特定的功能，可以传递材料的物理、化学性能等，如黏附性、摩擦性、润滑性、耐磨损性，或者具备特定的光学性能等。因此，微结构功能表面在光学系统、显示设备、聚光光伏产业、交通标志标牌、照明等领域被广泛应用。

针对自由曲面、微结构特征等复杂形状及结构超精密切削加工的特点，各国陆续研制了多轴超精密切削加工设备以及相关的加工工艺，近年来国内一些高校和研究所也研制成功了三轴至五轴的超精密车床，并在此基础上研发了快速刀具伺服加工、慢拖板伺服加工等超精密加工新技术（见图1-15）。



（a）非球面零件超精密加工　（b）光学自由曲面超精密加工　（c）微结构特征超精密加工

图1-15 复杂形状及结构零件的超精密加工

超精密加工技术的发展随着时代的进步其加工精度也不断提高，目前已经进入到纳米制造阶段。纳米级制造技术是超精密加工技术的巅峰，其研究需要具有雄厚的技术基础和物质基础条件，美国、日本及欧洲一些国家以及我国正在进行一些基础研究项目，包括聚焦电子束曝光、原子力显微镜纳米加工技术等，这些加工工艺可以实现分子或原子级的移动，从而可以在硅、砷化镓等电子材料，石英、陶瓷、金属及非金属材料上加工出纳米级的线条和图形，最终形成所需的纳米级结构，为微电子和微机电系统的发展提供技术支持。

1.2.2.3 精密超精密测量测试技术的发展

机械制造追求的目标是高效率地生产出高质量的机械产品，而要提高产品的质量和生产效率，需要依靠先进的测量技术获得与产品质量相关的有效信息，进而通过对这些信息的分析处理，得出能够用来控制或改进制造过程的相关决策。由于结构设计、加工工艺和材料性能等各方面的制约，零件本身及其装配精度受到一定程度的限制，所以机械制造精度的进一步提高，往往需要通过精密超精密测量与误差补偿技术的结合才能实现。

测量测试技术在制造过程的每个环节几乎是无处不在，贯穿机械制造产品生产的全过程。离线测量、在线测量、极限测量等各种相应的测量技术，在机械制造实现质量分析、工艺改进、技术革新等方面，起到了不可替代的关键作用。因此，测量技术尤其是精密超精密测量技术的发展水平及其在机械制造中的应用程度，是衡量先进制造科技水平、提高国家支柱产业核心竞争力的一个重要因素。

精密超精密加工技术等先进制造技术的兴起，已经在很大程度上扩展了测量技术的范围。测量参数的定义更加复杂，被测对象的尺寸小到纳米、原子量级，大到几十米甚至几百米，被测对象的形状也从规则的平面、曲面到自由曲面。随着测量精度的提高，测量条件受到环境影响的程度也越加明显，新的物理效应的应用，新的光机电的结合方法和信息融合技术应运而生。常规测量越加成熟，极限尺寸的测量研究越来越受到人们的关注和投入。

机械制造中的测量通常包含两个方面：制造系统（加工设备）的测量和被加工对象（工件）的测量。前者主要针对机床设备的几何精度和性能（如运动性能、动态特性、力学性能、温度及电磁特性等）进行测量；后者涉及到加工与装配中的测量，以几何量测量为主。

（1）极端制造中的测量技术成为测量中的前沿技术

随着 MEMS、微纳米技术的兴起与发展，人们对微观世界探索的不断深入，测量对象尺度越来越小，甚至达到了纳米量级；另一方面，由于大型和超大型机械系统（电站机组、航空、航天制造）、机电工程的制造及安装水平的提高，以及人们对于空间研究范围的扩大，测量对象尺度覆盖范围越来越大，机械制造中从微观到宏观的尺寸测量范围不断扩大。在此背景之下，微纳制造、超精密制造、巨系统制造等系统中，传统的测量方法和测量仪器受到极大挑战，出现了纳米尺度表征以及参数量值的统一和溯源等许多新的科学问题和工程技术问题，亟待解决。

（2）从静态测量到动态测量，从非现场测量到现场在线测量

现代制造业已呈现出和传统制造不同的设计理念，机械制造中的测量技术已不仅仅是最终产品质量评定手段，更重要的是为产品设计、制造服务，为制造过程提供完备的过程

参数和环境参数，使产品设计、制造过程和检测手段充分集成，形成具备自主感知内外环境参数（状态），并作相应调整的“智能制造系统”，使测量技术从传统的“离线”测量，进入到制造现场，参与到制造过程，实现“在线”测量。

（3）测量过程从简单信息获取到多信息融合

先进制造中的测量信息包括多种类型的被测量，信息量大，包含了海量数据信息。这些信息的可靠、快速传输和高效管理以及如何消除各种被测量之间的相互干扰，从中挖掘多个测量信息融合后的目标信息，将形成一个新兴的研究领域，即多信息融合。

（4）非接触测量精度进一步提高

对于一些典型航空大型结构件或者复杂结构及形状的零件如机匣和叶片等，目前通常采用三坐标接触式测头测量其形状精度和尺寸精度，测量效率往往无法满足生产需求。而非接触扫描测量是提高测量速度的有效途径，如何攻克光学测头对材料的适应性、标定、轨迹规划、控制及测量软件等技术是实现高精度非接触测量的关键。

在未来一段时间内，应重视机械制造一线的测量技术重大需求和新出现的测量问题，重点关注包括新型传感原理及传感器研究，超大尺寸及微纳米级精密测量，先进制造的现场、非接触、数字化测量，仪器智能化等相关测量理论及技术研究，复杂面形的精密超精密检测、高精度非接触快速测量等关键技术。

1.3　超精密加工技术发挥的作用

1.3.1　促进现代基础科学和应用基础科学的发展

量子力学和相对论是近代物理学和其他基础科学的核心，20 世纪 30 年代已经建立，但是其中一些理论还未得到实验验证，例如爱因斯坦的广义相对论中的两个预言即重力场弯曲效应和惯性系拖曳效应，这些理论在天文学、空间探测等方面有着重大的指导意义。例如航天器围绕地球旋转，在牛顿的宇宙模型中指针会指向同一方向，而在爱因斯坦的模型中，由于地球对周围时空的扭曲和拖曳，陀螺仪指针会倾斜一非常小的角度（一年内指针仅移动 6000mrad/s，这就是所谓的重力场弯曲效应和惯性系拖曳效应，这两种现象十分微弱，通过实验室验证是不可想象的。

美国国家航空航天局（NASA）为了验证爱因斯坦广义相对论的上述两项预言从 1963 年开始计划，但直到 2004 年才发射了一个利用高精度陀螺仪的测量装置——引力探测器，用于检测地球重力对周围时空影响。其中陀螺仪的核心部件——石英转子（ϕ38. 1mm）的真球度达到了 7. 6nm，若将该转子放大到地球的尺寸，要求地球表面波峰波谷误差仅为 2. 4m，如此高的加工精度可以说将超精密加工技术发挥到了极限，最终陀螺精度达到了 0. 001″/年（见图 1－16）。

20 世纪 80 年代以前，太赫兹（THz）波段（介于微波与红外之间）的研究结果和数据非常少，主要是受到有效太赫兹产生源和灵敏探测器的限制。随着 80 年代一系列新技术、新材料、新工艺的发展，使得太赫兹技术得以迅速发展。近年来由于太赫兹的独特性能将给宽带通信、雷达、电子对抗、电磁武器、天文学、医学成像、无损检测、安全检查等领域带来深远的影响，太赫兹基础及应用基础技术已经逐渐成为研究热点。





图 1－16　高精度陀螺仪的核心部件



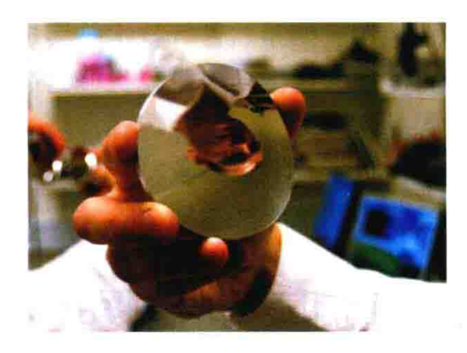


图 1－17　太赫兹光导向抛物面镜及光瞄准和聚焦的离轴抛物面镜

太赫兹技术在航空领域的重要应用是太赫兹雷达可用于隐身飞行器探测，其中束控元件是太赫兹探测系统的重要功能部件，其透镜主要采用硅基远红外透射材料，反射元件面形有抛物面、椭球面、离轴非球面以及赋形曲面等（见图 1－17），采用铝等金属基材料。我国在研的主反射元件尺寸已有 ϕ300mm、ϕ800mm、ϕ1000mm 等，面形精度要求已达微米级，表面质量要求为镜面，并且要求零件精度质量具有良好的稳定性。我国中期发展的太赫兹系统拟采用 4～5m 直径的主镜，远期主镜直径将达 30m 或更大，太赫兹系统束控主反射元件面形也将采用主动控制的拼接式平面、离轴非球面等形状。基于上述要求，需要大型单点金刚石超精密车削设备、复杂曲面超精密加工工艺技术、大型复杂曲面的高精度三坐标测量技术等支撑。





图 1－18　轴承滚动体的疲劳破坏

1.3.2　是支撑现代高新技术产业发展的基础

我国目前非常重视交通、能源、信息、生物医药等高新技术产业的发展，但是目前这些产业的核心技术国内还没有掌握，关键设备或零部件仍然依赖进口。如高性能轴承是飞机发动机、高铁、风电等产品的关键元部件，但由于目前国内材料、工艺等方面的原因，目前国内的高端轴承还无法生产，使用寿命与国外存在较大差距，这也是我国航空发动机、高铁、风电等整体水平低下的重要原因之一。例如国内航空发动机的飞行寿命与国外相差一个数量级，差距十分巨大。再进一步研究发现，轴承的损坏主要是由于承受了高频载荷，使滚动体发生了疲劳破坏，如图 1－18 所示，也就是承受高频载荷的部件的使用寿命远远不能满足要求。

近年国内开始研究的抗疲劳制造技术是以被加工件的疲劳强度及疲劳寿命为判据，其中的核心技术之一是精密超精密加工工艺，可提高表面质量、改善表面应力状态，从而提高零件的疲劳寿命，这不仅要求具有超精密加工设备及工艺，而且还需研制材料及零部件的疲劳寿命精密测试设备（如图 1－19 所示）。这些专用测试设备研制过程中涉及了精密超精密技术的概念。例如滚动体发生接触疲劳后会产生微小的剥落，开始之初面积可能不到 $1mm^2$，深度也只有几微米或更小，由于这样的缺陷存在运动时可能产生一个微弱的振动，测试设备需要在第一时间非常敏感地检测出发生疲劳破坏时产生的微弱信号。因此，对整台测试设备的精度和动态性能提出了严格的要求，首先需要一个高精度的轴系，运转起来要求非常平稳，主轴回转时产生的振动不至于干扰疲劳剥落信号的采集，一般可采用空气静压轴承；其次微弱信号的采集、识别与抗干扰处理技术，难点在于振动检测中振动位移信号容易受到各种背景噪声的干扰，需要采用跟踪滤波技术，实现信号自适应滤波，获得准确的振动信号用于疲劳状态的判断。



（a）圆柱滚动接触疲劳寿命测试设备



（b）钢球滚动接触疲劳寿命测试设备

图 1－19　滚动接触疲劳寿命测试设备

新能源产业如太阳能等在国内虽然发展很快，但核心技术还是掌握在国外，如硅片切割、研磨、抛光、刻划设备，高倍聚光菲涅尔透镜模具超精密加工设备等与国外还存在较大差距。信息产业的发展推动了芯片、存储等领域的进步，随着存储密度越来越高，对磁盘的表面粗糙度以及相应的读写设备的悬浮高度及磁头的上下跳动量的要求大大提高，目前国外已经可以把磁头、磁盘的相对间隙精度最高控制在 1nm 左右。在医疗器械行业，超精密加工技术也起着很大的作用，人造关节采用钛合金或其他贵金属材料，这些高精度

零件的表面处理对清洁度、光整度和表面粗糙度具有极高要求，需要进行超精密研抛，形状要根据个人的身体结构定制，国外价格昂贵，而国内在使用寿命及安全性等方面存在较大差距。其他如微型内窥镜中的微小透镜及器件、心脏搭桥及血管扩张器、医用微注射头阵列等国内现在还无法生产。

1.3.3 是研制现代武器装备的重要技术支撑

超精密加工技术对国防武器装备的发展具有重大影响，掌握超精密加工技术并具备相应的生产能力是国防工业步入现代国防科技和武器装备尖端技术领域的必要手段，20 世纪 90 年代初，美国就将其列为 21 项美国国防关键技术之一。

1.3.3.1 惯导部件

现代战争取胜的关键技术之一是精确打击，精度提高 1 倍相当于弹药量提高了 10 倍。例如摧毁一个目标，在第二次世界大战时可能需要 9000 发炮弹，在越南战争时需要 300 发，到了海湾战争时只需要 2 枚导弹。精确打击的关键技术是精确制导，核心器件是惯性仪表。惯性器件有很多种，从挠性陀螺到三浮陀螺，从激光陀螺到光纤陀螺等，不管哪种陀螺关键零部件的加工都离不开超精密加工技术。如图 1－20 所示为激光陀螺反射镜的腔体和基片。

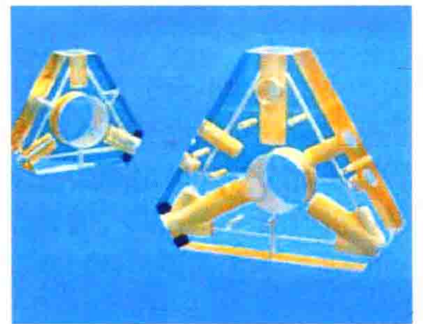
  

图 1－20　激光陀螺反射镜的腔体和基片

超精密加工技术的发展对飞机、导弹等惯性器件的发展做出了突出贡献。美国 1962 年就研制成功了激光陀螺，但因未突破硬脆材料的陀螺腔体和反射镜的超精密加工技术，使激光陀螺在飞机上的应用整整延迟了 20 年，超精密车削、磨削、研磨以及离子束抛光等工艺的相继突破才使激光陀螺投入了批生产，并将陀螺性能指标提高了两个数量级。半球谐振陀螺仪中半球谐振子采用超精密振动切削工艺达到了精度和性能指标。激光加工和离子刻蚀等超精密加工技术是制造硅微型惯性传感器的重要工艺，这将对飞机和导弹惯性系统的小型化起重要作用。采用超精密铣削工艺及超精密研抛工艺提高了惯性传感器中挠性件的精度和尺寸稳定性。此外飞控系统中的液压零件采用超精密磨削及研磨抛光和超精密清洗工艺，对提高飞机的可靠性、可维修性和寿命起到了至关重要的作用。

面对各种先进探测手段和精确制导防空武器的威胁，美国、俄罗斯都在加紧发展其隐身化、高机动、多用途的新一代战斗机。我国的新一代战机也具有隐身、非常规机动、多传感器数据融合等全新特点。高机动能力要求机载设备及武器必须小型化；采用的多传感

器信息融合技术也要求所配套的传感器能够减小体积，增加新型传感器数量；对于惯性传感器而言，高可靠性的设计要求，更需要能够小型化，以便减小转动部分的转动惯量。以上信息均表明世界空军的机载设备及武器发展呈现出小型化、智能化、高精度化和高可靠性化的趋势。

惯性技术是提高空中攻击能力、机动能力的必要技术。而惯性器件则是提高惯性系统精度的必要条件。我国为新一代战斗机配套的其他技术，特别是隐身技术和激光武器已有了相应的发展，因而为决定打击命中率的惯性系统配套的惯性传感器的研制更为迫切。相应的制造技术也必须从现有的较大要素精密加工转向微小化、高精度的微细精密加工。如图1-21所示的为小型挠性加速度计中的挠性结构件其最小特征尺寸仅为9μm。

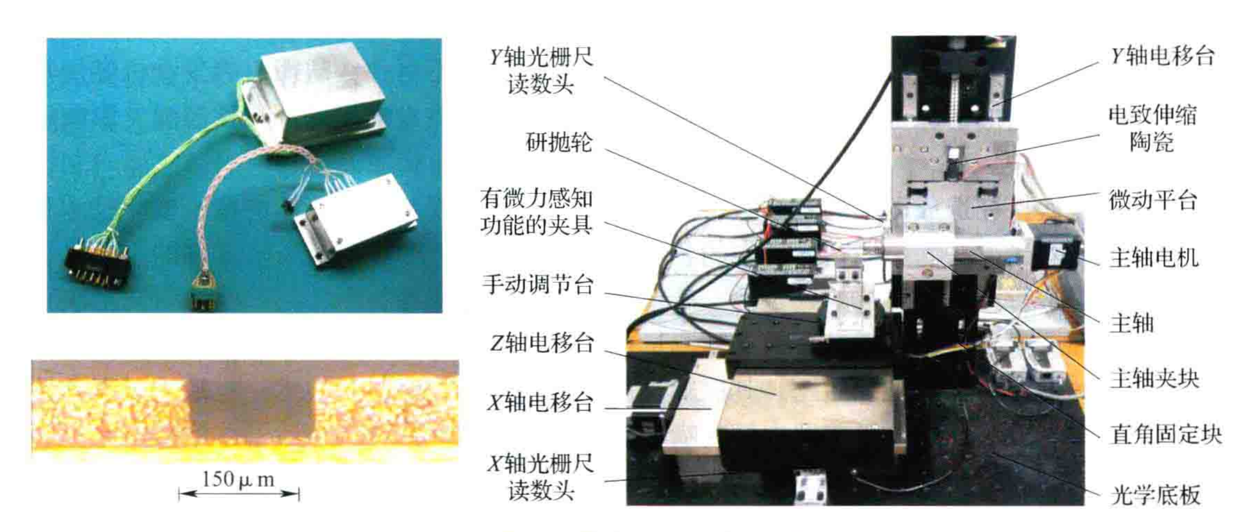


图1-21 惯性传感器关键元件的超精密加工

随着高精度惯性传感器结构的微小型化、工作部位尺寸及形位精度等级的亚微米化，以及新型材料的应用，现代精密加工技术与传统的精密加工技术迥然不同，微小结构零组件装夹、定位、找正的精细化，刀具的小型化和加工进给量的微量化、非接触面形和尺寸测量显微化等一系列技术难题对传统精密加工技术提出严峻挑战，迫切需要开展微小结构零组件加工和装配工艺技术研究，因此需要在现有的精密加工工艺的基础上建立精密微细制造、微细组装工艺技术平台，进行技术研究与技术储备，以满足小型化高精度惯性传感器微细精密制造和装配需求。

1.3.3.2 导弹头罩

超精密加工技术使导弹关键元器件的精度和质量产生了飞跃，进而大大提高了导弹的命中率和攻击距离。导弹头罩既要保护导弹的探测和制导系统，同时又不能影响系统的正常工作，导弹在飞行过程中头部受到的空气阻力最大。为此对头罩的材料和形状提出了严格的要求，材料需要透波（红外），还要耐高温；头罩的外形要适应空气动力学（减小风阻），内部形状要适应透波的需要。所以头罩材料已经从红外向蓝宝石乃至金刚石薄膜发展，其硬度和耐磨性越来越高，外形从球面向非球面乃至自由曲面（保形）发展，形状越来越复杂，这一切对导弹头罩的超精密加工技术提出了越来越严的要求。

1.3.3.3 航空发动机喷嘴

燃油喷嘴组件对航空发动机燃烧室的工作性能、燃烧效率及可靠性具有直接及重大的

影响，要提高航空发动机燃烧室的工作性能及燃烧效率，必须对燃油喷嘴组件提出更高的要求。

发动机喷嘴组件的精度及表面质量对发动机性能产生以下影响。

（1）全寿命周期内的雾化质量

如果喷嘴内锥角过大，粗大的雾滴将穿过燃气到达火焰筒内壁，引起壁面过热和积炭，更严重的会造成火焰筒内壁面受热而产生严重变形；喷嘴内锥角过小，油滴将集中在火焰筒中心区，这会造成中心富油，燃烧不完全，极容易产生冒烟现象。另外，燃油雾化质量不高还会造成燃烧效率降低，增加发动机耗油量。

（2）喷嘴零件精度影响发动机工作状态时的稳定性和一致性

发动机燃烧室经过一段时间燃烧后，燃油喷嘴的工作状态会发生不一致性的改变，流量的不均衡会导致发动机燃烧室整周燃烧不均匀、热状态不对称，从而引起发动机燃烧室变形。更为严重的情况是，长时间的燃烧不均匀可能会造成发动机局部严重超温，影响发动机的安全工作。

从深层次探究造成以上问题的根本原因，我们可以发现是由于当前的精密检测技术和性能测试技术还无法满足喷嘴研究中的各项需求。首先缺乏对喷嘴的关键零件的重要尺寸或重要部位进行在线、离线的确定性、高精度、高效率的测量技术，尤其是针对同批次零件的一致性测量技术。由于没有确定性测量作基础，因此不能严格控制喷嘴的质量，也不能及时有效地反馈加工工艺问题。其次缺乏对喷嘴局部性能的测试技术，也缺乏对喷嘴性能的综合评价方法。所以目前国内的喷嘴检测只能依靠零件整体组装后的修配、总体性能测试及筛选而进行，严重影响了发动机性能及可靠性。

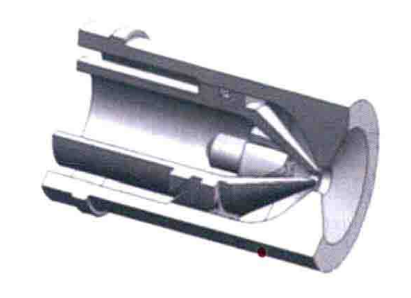




图 1－22　发动机喷嘴

1.3.3.4　航空发动机叶片

现代航空发动机设计载荷越来越高，推重比越来越大。叶片是航空发动机中面形复杂、尺寸变化大、工作环境恶劣的零件，叶片的加工质量决定着叶片的工作性能，而叶片的面形质量对发动机的二次流损耗有着较大的影响，直接影响着其能量转换效率。例如航空发动机的进排气边和机匣封严将影响发动机动力约 2% ～3%，影响发动机推力约 500kgf；而为提高发动机推力，需要提高涡轮前温度 15 ~30℃，由此将导致涡轮寿命缩短至原来设计预期寿命的一半。以某型战斗机为例，在发动机地面试车和常规空中试飞中，多次试验表现正常；但在战术快速拉升格斗等试验中，表现失常。经排故发现，导致战斗机表现失常的原因是发动机压气机进排气边的曲率半径不符合设计要求。因此，提高叶片面形及进排气边圆弧的加工精度与检测精度，将提高航空发动机总体性能、使用寿命和可靠性。

叶片型面/型线的设计期望按照流体动力学规律获得更高的动力和更好的效率，即用更小的体积来获得更大的输出功率。这就导致叶片的形状有几个显著特点：第一，叶片的型面是空间自由曲面，每个截面高度的型线轮廓形状不尽相同，并且同时呈扭转上升状；第二，叶片的前后缘部分相对厚度较薄，进排气边半径非常微小。例如目前发动机压气机叶片进排气边设计尺寸要求最小达到了 0.1mm、叶片型面轮廓制造精度要求小于 0.03mm。上述两个特点给叶片测量造成了一定的困扰。目前航空发动机叶片的检测通常采用标准模板定性检测或者终检采用三坐标测量机检测，但存在检测效率低，检测精度不高的特点，无法满足现场测量的要求。

航空发动机叶片以及叶盘的加工与检测在航空精密制造领域占据着重要的位置。对航空发动机这个“制造业的皇冠”而言，叶片更是“皇冠上的宝石”，叶片类零件的制造装备及关键技术代表着国家制造业的核心竞争力。对航空发动机来说，这些要求都对叶片的制造工艺和检测方法提出了新的挑战，不但对叶片加工与检测工艺的要求越来越高，而且对叶片加工与检测设备的要求也越来越高。

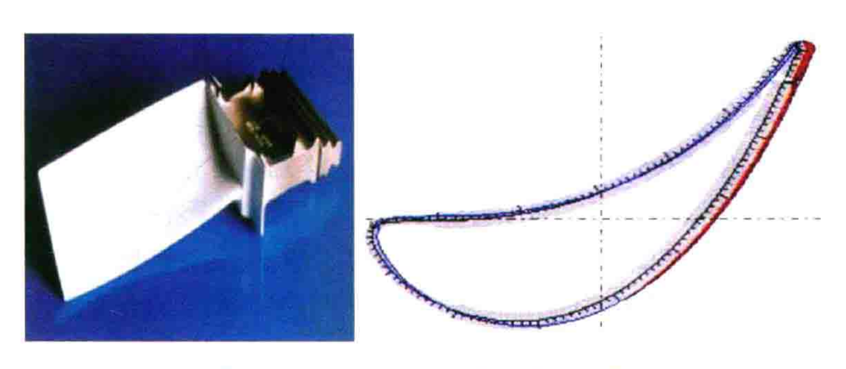


图 1－23　发动机叶片快速精密测量

1.3.4　是衡量一个国家制造水平高低的重要标志

制造技术不断追求的目标是质量和效率，其中质量就是精度和性能，也就是超精密加工技术水平的评价指标。前面提到美国、日本、德国、瑞士等国家的精密超精密加工技术具有很高的水平，同时这些国家的制造业水平在全球处于绝对领先地位，而我国近年来由于政府的重视及人力物力的投入，制造业有了长足的进步，但是目前我国还只能称作制造大国，为了向制造强国转换，必须提高精密超精密加工技术的水平。

超精密加工及纳米制造技术体现了一个国家制造业的综合实力，纳米机械加工由于具有效率高、可靠性好、成本低等特点，被认为是最有发展潜力的纳米精度制造方法之一，但由于材料去除是在纳米尺度，传统的加工理论不再完全适用，发展受到了一定的限制。近年来我国科技工作者经过不断努力已经在该领域取得了长足的进步。2013 年，世界制造领域的最高学术组织——国际生产工程科学院（CIRP）公布了于 2012 年 8 月开展的历时一年的国际精密制造技术对比结果，其微工程工作委员会对通过初选的世界各地 11 个研究小组提出了具体的对比样件及指标，各研究小组完成指定的样件加工后隐去样件来源信息，由德国物理技术研究院进行测量和评估，主要内容包括加工精度、表面质量、微小尺度、复杂形状等，最终仅有 2 个研究小组的加工试件满足全部 5 项评价指标，我国天津大学的纳米制造技术研究小组是其中之一，这在一定程度上也反映了我国近年来在这方面的进步。

1.3.5 与智能制造技术相互促进

国务院发布的《中国制造 2025》中明确提出，要“强化工业基础能力”，即统筹核心基础零部件（元器件）、先进基础工艺、关键基础材料和产业技术基础发展，加强创新能力建设，推动企业协同发展。作为先进基础工艺技术的典型代表，精密超精密加工技术一直是工业制造领域的最高要求与最终要求。

中国制造 2025 不等同于德国提出的工业 4.0 或美国提出的智能制造技术，目前国外的基础技术以及产品质量已经不是问题，而这些在中国的大部分领域还需要不懈的努力加以提高改进。智能制造技术是《中国制造 2025》的核心，其核心内容是：动态感知、实时处理、自主决策、精准执行，其中与精密超精密制造直接相关的包括：动态感知及精准执行，所谓动态感知就是通过各类传感及测量系统对制造过程和状态进行检测和监测，这就是精密测量测试；精准执行必须有执行元部件，比如高精度的直线运动机构、回转运动机构、运动控制系统等，这就是精密元部件、精密装备。

智能制造技术是一种先进的生产模式，需要材料、制造、检测、试验等基础技术支撑，离开这些基础技术，智能制造也是空谈。

一是可以将智能制造这种生产方式用于科研项目研发或生产中，提高精密超精密加工技术或装备的水平。例如国外加工中心刀具中间通冷却液，加上温度传感器、振动传感器、力传感器等状态感知传感器，加工过程中智能控制加冷却液的流量和流速；在超精密机床主轴上面增加位移、振动、温度等传感器，实时感知超精密主轴的工作状态，调整主轴的参数，保证主轴的精度等性能指标。

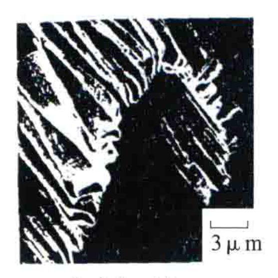
二是利用精密超精密加工及检测技术提高状态感知中精密检测、在线测量测试等技术水平，以及精密执行机构的精度、效率等，从而促进、提高智能制造技术的整体水平，为智能制造服务。

1.4 精密超精密加工技术的发展趋势

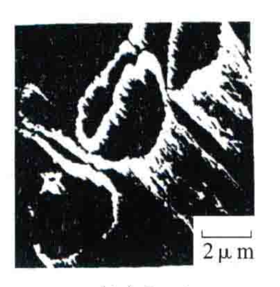
1.4.1 超精密加工技术基础理论和试验研究将进一步发展

所谓超精密加工技术基础理论是指对超精密加工过程的基本规律和现象的描述，掌握并了解后才能驾驭这一过程，取得预期结果。例如 20 世纪 90 年代初，日本学者用金刚石车刀在 LLNL 的 DTM3 上加工出最薄的连续切屑的照片，当时认为达到了 1nm 的切削厚度，已成为世界最高水平，如图 1－24 所示。那么超精密切削极限尺度是多少？材料此时是如何去除的？此外超精密加工工艺系统在力、热、电、磁、气等多物理量/场复杂耦合下的作用机理是什么？此时系统的动态特性、动态精度及稳定性如何保证等都需要得到新理论的支持。

随着计算机技术的发展，从 20 世纪 90 年代开始分子动力学仿真技术在物理、化学、材料学、摩擦学等领域得到了很好的应用，美国、日本等国首先应用该技术研究纳米级机械加工过程，国内从本世纪初在一些高校也开始应用分子动力学仿真技术对纳米切削及磨削过程进行了研究，可描述原子尺寸、瞬态的切削过程，在一定程度上反映了材料的微观去除机理，但这一切还有待于试验验证，如图 1－25 所示。



（a）h_D=30nm



（b）h_D=1nm

日本大阪大学和美国LLL实验室得到的
切削厚度极小的切屑（SEM照片）

图 1－24　1nm 切屑厚度 SEM 照片

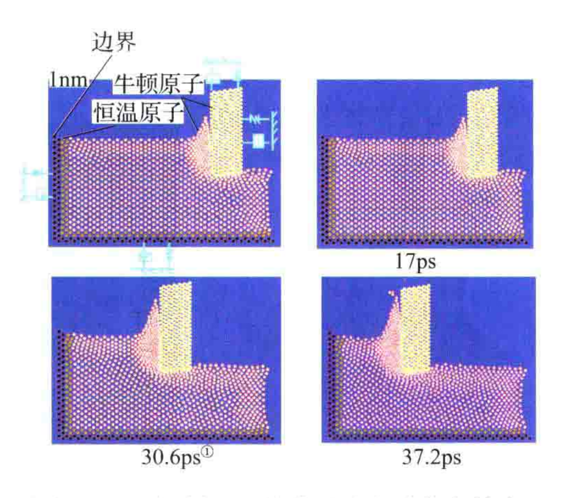


图 1－25　切削过程的分子动力学仿真技术

此外精密超精密加工技术不仅要保证一个图样上的几何量满足设计要求，而且要保证零件的最终使用性能，包括力学性能、物理性能等指标也要满足使用要求，也就是说考核指标需要不断拓展。例如很多航空、航天的许多单位都提到过传感器框架零件加工完以后精度能满足图样要求，但是零件放置一段时间后发生了变形结果就超差；或者惯性仪表装配完后能达到精度，但是使用一段时间后精度发生了变化，某些精密设备或仪器也存在这样的问题，产品交检时合格，但用户使用一段时间后超差需要重新调试。主要原因是材料本身或者加工过程中，或者装配过程中产生的残余应力等因素使零件发生了变形，所以超精密加工工艺不仅要保证几何尺寸和几何精度，还需要关注、检测残余应力等力学指标。其实这种要求与表面完整性制造或抗疲劳制造有类似之处，抗疲劳制造考虑的是如何保证零件的疲劳强度和寿命，超精密加工工艺则保证零件的精度保持性。

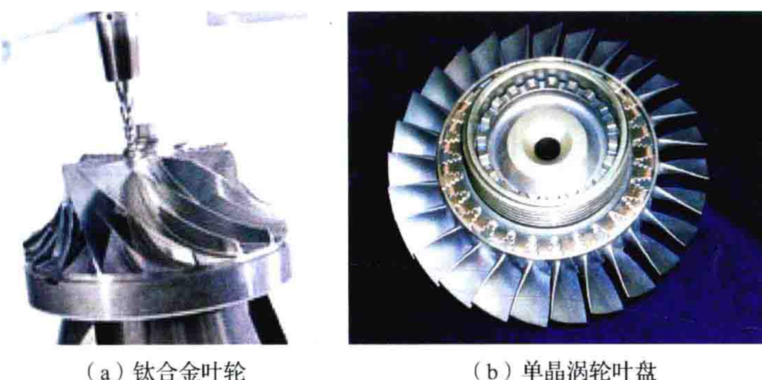
1.4.2　被加工材料和工艺方法在不断扩展

钛合金是航空最常用的材料之一，氢作为有害杂质元素对钛合金的使用性能有极其不利的影响，会引起钛合金氢脆、应力腐蚀及延迟断裂等，但是近年来研究表明通过合理有效地控制渗氢、相变及除氢等过程，获得钛合金组织结构的变化，可以改善其加工性能，提高加工表面质量和效率。同样通常认为黑色金属是无法利用天然金刚石进行超精密切削加工的，多年来也一直在进行各种工艺研究，如利用低温流体（液氮或二氧化碳）冷却切削区，进行低温冷却车削；采用超声振动切削黑色金属；采用金刚石涂层刀具等；采用离子渗氮和气体渗氮工艺对模具钢进行处理，但上述方法到目前为止还无法工程化应用。近年来通过离子注入辅助方式改变被加工材料表层的可加工性能，实现硅等硬脆材料复杂形状的高效超精密切削。

抗疲劳制造技术的发展为超精密加工技术提出了新的发展方向，超硬材料的精密加工工艺要求控制表层及亚表层的损伤及组织结构、应力状态等参数，如航空发动机轴承材料 M50NiL 表面处理后硬度超过了 70HRC。随着单晶涡轮叶盘和单晶涡轮叶片在航空发动机

① 1ps = 10^{-12}s。

上的应用，对被加工材料要求没有重融层和变质层，从而对精密加工工艺提出了新的要求。特殊材料的精密超精密加工见图 1 - 26。



（a）钛合金叶轮　　（b）单晶涡轮叶盘　　（c）黑色金属超精密切削

图 1 - 26　特殊材料的精密超精密加工

前面提到随着导弹飞行马赫数的增加，首先要求头罩材料的抗磨损性提高，已从红外材料向蓝宝石材料头罩乃至金刚石薄膜材料发展，形状也从球形向非球面乃至自由曲面发展，对超精密加工设备、工艺及检测技术提出了新的要求（见图 1 - 27）。

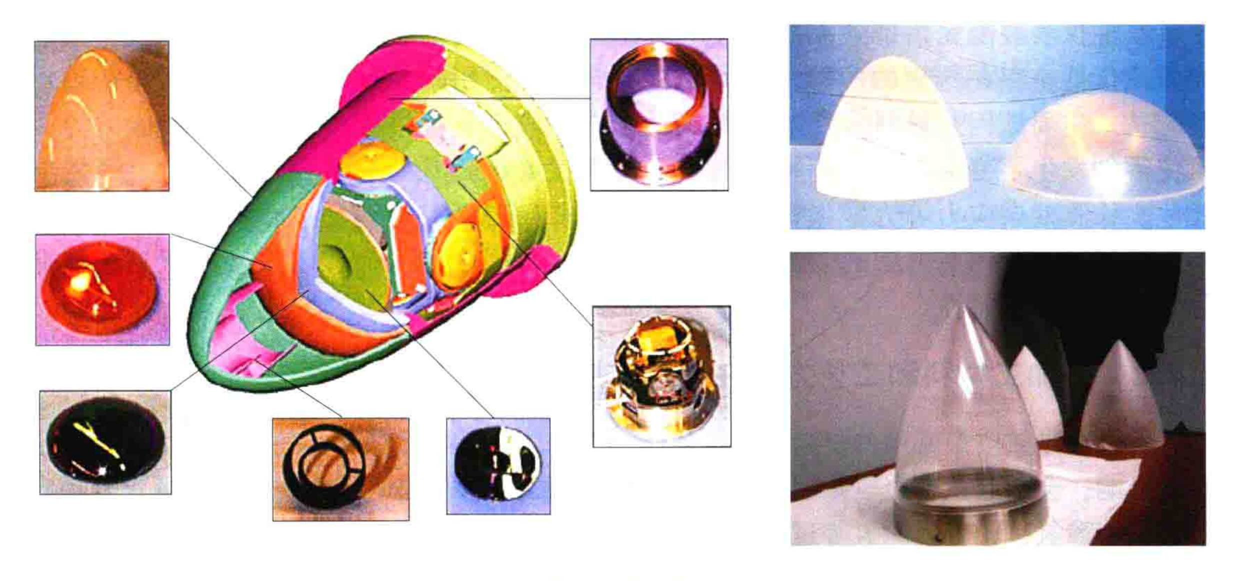


图 1 - 27　导弹头罩的形状

1.4.3　微结构功能表面的超精密加工技术正在兴起

微结构功能表面是指具有特定的拓扑形状，结构尺寸一般为 10 ~ 100μm，面形精度小于 0.1μm，其表面微结构具有纹理结构规则、高深宽比、几何特性确定等特点，如凹槽阵列、微透镜阵列、金字塔阵列结构等，这些表面微结构使得元件具有某些特定的功能，可以传递材料的物理、化学性能等，如黏附性、摩擦性、润滑性、耐磨损性，或者具备特定的光学性能等。例如在航空、航天飞行器宏观表面加工出微纳结构形成功能性表面，不仅可以减小飞行器的风阻、摩阻，减小摩擦，还可以避免结冰层形成，提高空气动力学和热力学功能，从而达到增速、增程、降噪等目的，同时表面特定的微结构特征还能

起到隐身功能，增强突防能力。

人们从仿生学角度出发模拟自然界的一些植物或动物的特征从而实现某种特定的功能。例如，荷花具有出污泥而不染的特征，鲨鱼如此庞大的身躯却能在大海中自由快速地游动。对荷叶表面进行微观观察，发现表面有很多微小的突起（10μm 左右），每个突起上又有更加微小的颗粒（小于 1μm）。正是这些微特征的存在使荷叶有了超疏水性，所以水珠以及其他污染物不易在荷叶上黏附。观察鲨鱼表面的鳞，其表面是由许多沟槽组成，改变了水流的阻力（见图 1－28）。



图 1－28　自然界的微结构功能表面

应用微结构仿生学最典型的例子是游泳运动员的泳衣，编织时在其表面控制了编织纹理及形状——俗称鲨鱼皮泳衣，减小了阻力，结果使运动员的成绩有了大幅度的提高，使国际泳联不得不禁止使用这种高科技的泳衣。此外微结构功能表面在光学系统、显示设备、聚光光伏产业、交通标志标牌、照明等领域被广泛应用，如 LCD 显示器的背光模组的各种光学膜片，背光模组关键件——导光板、扩散板、增光膜等，聚光光伏太阳能（CPV）系统的菲涅尔透镜，道路标示用微结构光学膜片、新一代 LED 照明用高效配光结构等。

未来的零部件设计与制造将会增加一项功能表面结构的设计与制造，通过在零件表面设计和加工不同形状的微结构，从而提高零部件力学、光学、电磁学、声学等功能，这将是微纳制造的重要应用领域，2006 年成立的国际纳米制造学会经专家讨论并认同，纳米制造中的核心技术将从 MEMS 技术逐步转向超精密加工技术。

1.4.4　超精密加工技术开始追求高效

超精密加工技术最初是为了保证一些关键零部件的最终精度，所以当初并不是以加工效率为目标，更多关注的是精度和表面质量，例如一些光学元件最初的加工周期是以“年”为加工周期。但是随着零件尺寸的进一步增大和数量的增多，目前对超精密加工的效率也提出了要求。例如为了提高观察天体范围和清晰度，需不断加大天文望远镜的口径，这就出现了天文版的摩尔定律，即每隔若干年，光学望远镜的口径增大一倍，如建于

1917 年位于美国威尔逊山天文台的 Hooker 望远镜的口径为 2.5m，是当时全世界最大的天文望远镜；到 1948 年被 Hale 望远镜取代，其口径达到了 5m；1992 年新建成的 Keck 望远镜的口径达到了 10m，目前仍在发挥着巨大的作用。目前正在计划制造的巨大天文望远镜 OWL 主镜口径达到 100m，由 3048 块六边形球面反射镜组成，次镜由 216 块六边形平面反射镜组成，总重约（1～1.5）$\times 10^{8}$kg，按照目前现有的加工工艺，可能需要上百年的时间才能完成。

此外，激光核聚变点火装置（NIF）需要 7000 多块 400mm 见方的磷酸二氢钾（KDP）晶体，如果没有高效超精密加工工艺，加工时间也无法想象。为此需要不断开发新的超精密加工设备和超精密加工工艺来满足高效超精密加工的需求（见图 1－29）。

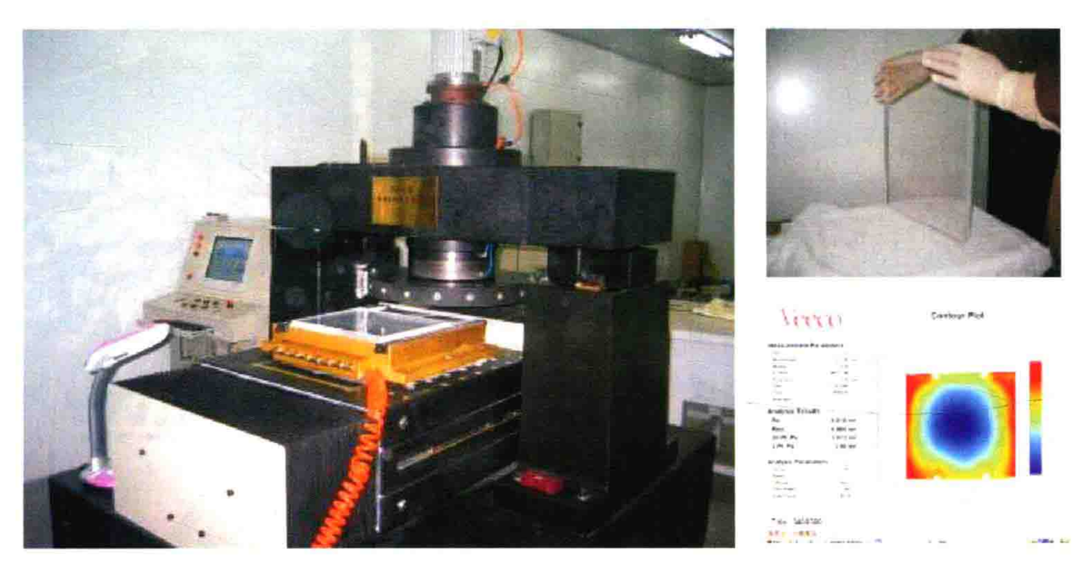


图 1－29　KDP 晶体超精密加工技术

1.4.5　超精密加工技术将向极致方向发展

随着科技的进步，对超精密加工技术已经提出了新的要求，如要求极大零件的极高精度、极小零件及特征的极高精度、极复杂环境下的极高精度、极复杂结构的极高精度等。

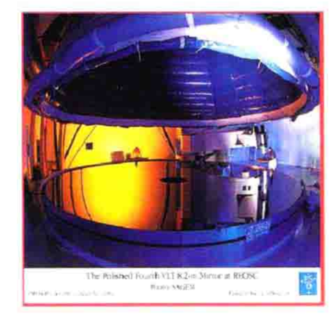
欧洲南方天文台正在研制的超大天文望远镜 VLT 反射镜为一块直径 8.2m、厚 200mm 的零膨胀玻璃，经过减重后重量仍然达到了 21t。法国 REOSC 公司负责加工，采用了铣磨、小磨头抛光等加工工艺，加工周期为 8～9 个月，最终满足了设计要求，目前许多新的超精密加工工艺如应力盘抛光、磁流变抛光、离子束抛光等的出现为大镜加工提供了技术支撑（见图 1－30）。

前面提到的微纳结构功能表面结构尺寸小到几个微米，如微惯性传感器中的敏感元件挠性臂特征尺寸为 9μm，而其尺寸精度却要求 ±1μm。

美国国家标准计量局研制的纳米三坐标测量机（分子测量机）是在极复杂环境下如何实现极高精度测量的典型例子，该仪器测量范围 50mm × 50mm × 100μm，精度达到了 1nm，对环境要求及其严格，最内层壳温度控制在 17 ±0.01℃，次层壳采用主动隔振，高真空层工作环境保持 1.0×10^{-5}Pa，最外层壳用于噪声隔离，最后将整体结构安装在空气弹簧上进行被动隔振。







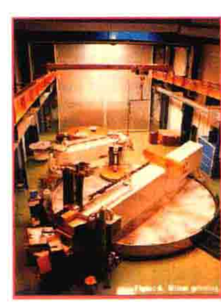


图 1-30　超大天文望远镜 VLT 反射镜的超精密加工

自由曲面光学曲面精度要求高、形状复杂，有的甚至无法用方程表示（如赋值曲面），但由于其具有卓越的光学性能，近年来应用范围不断扩大，自由曲面光学零件的设计、制造及检测等技术还有待于进一步发展。

1.4.6　超精密加工技术将向超精密制造技术发展

超精密加工技术以前往往是用在零件的最终工序或者某几个工序中，但目前一些领域中某些零部件整个制造过程或整个产品的研制过程都要用到超精密技术，包括超精密加工、超精密装配调试以及超精密检测等，最典型的例子就是美国国家点火工程（NIF）。

为了解决人类的能源危机，各国都在研究新的能源技术，其中氘、氚的聚变反应产生巨大能源可供利用，而且不产生任何放射性污染，这就是美国国家点火工程。我国也开始进行这方面的研究，被称为“神光”工程。NIF 整个系统约有两个足球场大小，共有 192 束强激光进入直径 10m 的靶室，最终将能量集中在直径为 2mm 的靶丸上。这就要求激光反射镜的数量极多（7000 多片），精度和表面粗糙度极高（否则强激光会烧毁镜片），传输路径调试安装精度要求极高，工作环境控制要求极高。对于直径为 2mm 的靶丸，壁厚仅为 160μm，其中充气小孔的直径为 5μm，带有一直径为 12μm、深 4μm 的沉孔。微孔的加工困难在于其深径比大、变截面，可采用放电加工、飞秒激光加工、聚焦离子束等工艺，或采用原子力显微镜进行超精密加工。系统各路激光的空间几何位置对称性误差要求小于 1%、激光到达表面时间一致性误差小于 30fs①、激光能量强度一致性误差小于 1% 等。如此复杂高精度的系统无论从组成的零部件加工及装配调试过程时刻都体现了超精密制造技术。

前面提到的用于新一代武器装备的小型高精度惯性传感器研制和生产过程具有以下

① $1fs = 1 \times 10^{-15}s$。

特点：

①零部件结构的小型化；

②工作部位尺寸及形位精度的亚微米化；

③微小结构零组件装夹、定位、找正的精细化；

④刀具的小型化和加工进给量的微量化；

⑤非接触面形和尺寸测量显微化；

⑥微小结构零组件加工和装配工艺精细化等。

这一切都需要涉及超精密加工、测量及装配调试，需建立系统的超精密加工设备及工艺、测量、组装调试工艺技术平台，以满足微细超精密加工、装配和检测的需求。这样也就实现由单工序的超精密加工向全过程的超精密制造的演变。

综上所述，从大到天体望远镜的透镜，小到大规模集成电路等微纳米尺寸及特征零件的制造，超精密加工技术从发展之初一直面临着不断的挑战。当前精密超精密加工技术在不断研究新理论、新工艺以及新方法的同时，将向着高效、极致等方向发展，并贯穿零部件整个制造过程或整个产品的研制过程，向精密超精密制造技术发展。随着我国精密超精密技术的不断发展和进步，必将实现从制造大国向制造强国的飞跃。

第 2 章 超精密基础元部件

各类超精密加工设备结构既有共性又有个性，所谓共性是指不同超精密加工设备可以通用的系统，如主轴回转系统、直线运动系统、驱动系统、隔振系统、温度控制系统等，而个性是指由于加工工艺和规格等不同造成的机床结构不同，如超精密车削、磨削、铣削等不同加工工艺要求有不同的机床布局结构，为满足机床功能性需求采用多轴设计使机床的结构不同。因此研制各种通用的超精密加工设备基础元部件（模块），再根据不同的需求将相关模块组合成所需的超精密加工设备，可以缩短超精密加工设备的研制周期，降低研发成本，成为在现有条件下发展我国超精密加工设备的一种可行方式。

模块化设计及制造技术是超精密加工设备研发过程中所应遵循的一个原则，也是降低研发成本、缩短研制周期的关键技术，该技术已成为超精密加工设备研发和生产的关键。

本章内容主要涉及具有特殊结构或特殊功能的精密超精密元部件及工装，而对于较为成熟的诸如通用空气或液体静压主轴及导轨、驱动系统、隔振系统、温度控制系统等，在此不再赘述。

2.1 空气静压重力平衡气缸

2.1.1 概述

超精密加工机床的要点之一是机床具备极高的运动精度和控制精度，对具有竖直运动部件的超精密加工机床（例如立式超精密车床、五轴复合超精密加工机床等），为了获得极高的运动精度和控制精度，机床竖直运动部件的重量需要进行准确的平衡，且要求由于平衡引起的干扰力足够小。

加工机床竖直运动部件重力平衡方式可以采用配重平衡、液压缸平衡和气缸平衡等多种方式；早期的超精密加工机床多数采用配重平衡方式；现在超精密加工机床多数采用了空气静压轴承润滑的气缸平衡方式。美国普雷西泰克（Precitech）公司的 Freeform 750 系列五轴加工机床、摩尔公司 Nanotech 系列五轴加工机床、LLNL 国家实验室的 LODTM 大型光学金刚石机床上，都采用了空气静压轴承平衡气缸。图 2 - 1 是摩尔公司 Nanotech 350FG 上面的空气静压轴承



图 2 - 1 摩尔公司 Nanotech 350FG 机床上空气静压轴承平衡气缸

平衡气缸照片。空气静压轴承平衡气缸平衡精度高、平衡力可调，由摩擦产生的干扰力小，运动部件质量小，比传统的配重平衡方式有显著优势。

2.1.2 气体静压平衡气缸技术应用分析

气缸是工业产品中的常用执行机构，用于实现位移传动和推力控制。在传统的胶圈密封结构中，密封胶圈以过盈的方式与活塞杆或气缸套筒配合，所以会产生较大的运动摩擦阻力。活塞杆与导向套之间、活塞与套筒之间都采用滑动配合导向，运动中会产生一定的滑动摩擦。滑动摩擦力的方向总是与运动方向相反，所以当气缸供气压力恒定时，随着气缸运动方向的变化，摩擦力会使气缸输出推力的大小发生变化；而且，摩擦力是非线性黏滞力，随着速度的变化摩擦力大小也会有变化；所以，胶圈密封对气缸推力的准确性和恒定性有极大的影响。对气缸推力精确性有较高控制要求的场合，传统气缸的使用有局限性。传统气缸的结构原理如图 2－2 所示。

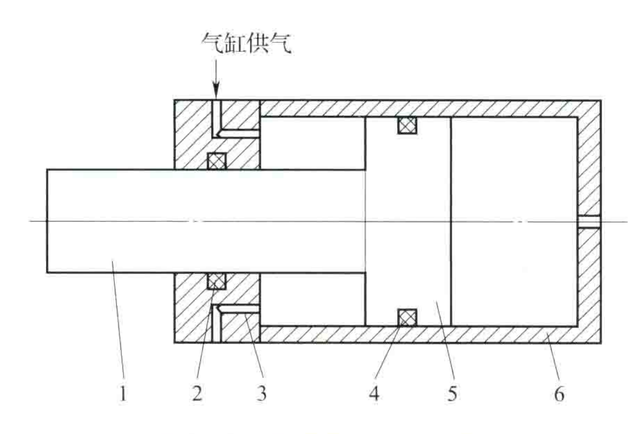


图 2－2　传统气缸结构原理图

1—活塞杆；2—密封圈；3—活塞杆导向套；4—密封圈；5—活塞；6—气缸套筒

在具有竖直运动部件的机床和仪器设备中，经常需要对竖直运动部件的运动质量进行精密的重力平衡，精密的重力平衡是实现精密运动控制的基础。气缸平衡方法是竖直运动部件重力平衡经常采用的方法之一。超精密数控机床的配重平衡必须有效地降低运动平衡系统的摩擦阻力和非线性黏滞阻力；通过在平衡系统中采用气体静压导向和间隙密封等技术，有效地降低运动的摩擦阻力和非线性黏滞阻力，消除平衡系统对机床导轨运动系统的干扰；通过控制供气压力的稳定等措施，实现超精密机床竖直运动部件配重平衡的准确、精密和恒定，基本实现无干涉的重力平衡。

空气静压轴承导向无干涉气缸的发明正是解决超精密机床竖直运动部件的重力平衡的技术难题。

2.1.3 空气静压润滑气缸的技术实施方案

空气静压轴承导向无干涉气缸用于超精密机床的竖直运动部件的重力平衡系统，可以对机床运动部件实现精密准确的重力平衡和无摩擦干扰力的运动控制，实现竖直运动部件的无干涉运动和微位移控制。该机构采用空气静压轴承做气缸的导向和密封，实现气缸运动时无摩擦干扰力的运动，实现气缸运动时输出推力的准确、精密和恒定，实现气缸的精

密平衡控制。空气静压轴承导向无干涉气缸机构图如图 2－3 所示。

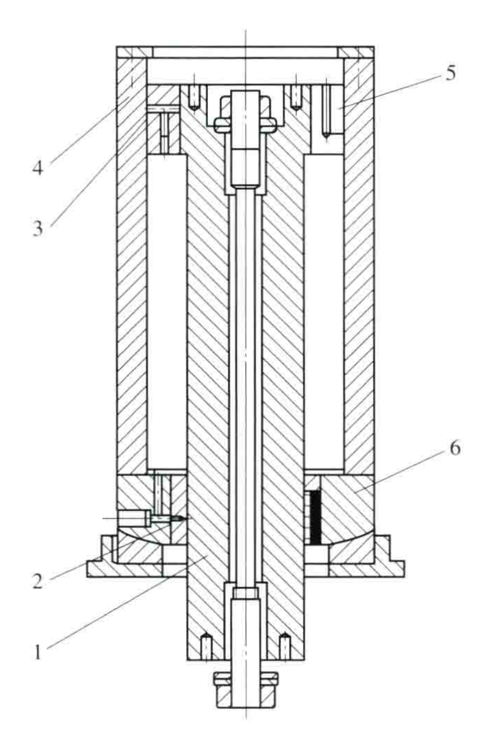


图 2－3　空气静压导向平衡气缸结构图

1—活塞杆；2—活塞杆导向轴承节流孔；3—活塞导向轴承节流孔；4—气缸套；5—活塞；6—活塞杆导向套

在以上结构中，在活塞杆导向套（6）上均布有节流孔和气槽，活塞杆导向套（6）与活塞杆（1）之间以及活塞（5）与气缸套（4）之间均采用小间隙配合，实现了活塞和活塞杆运动的空气静压轴承导向和无接触密封。

该结构的特征之一在于，在活塞杆与活塞杆导向套间形成空气静压轴承副；在活塞杆导向套上沿圆周方向均布有多个通过节流孔供气的喷气嘴和气室，使活塞杆和轴承套之间形成空气静压轴承导轨副。同时，在导向空气静压轴承与气缸压力室之间，有通向大气的泄压环；在泄压环与气缸压力室之间，活塞杆与轴承套间采用间隙密封；从而保证活塞杆运动时活塞杆轴承套之间完全没有固体滑动摩擦接触。

该结构的另一个特征在于，在活塞与气缸套间形成空气静压轴承副；在活塞上沿圆周方向均布有多个通过节流孔供气的喷气嘴和气室，使活塞和气缸套之间形成空气静压轴承导轨副。同时，在空气静压轴承与气缸压力室之间，有通向大气的泄压环；在泄压环与气缸压力室之间，活塞与气缸套间采用间隙密封；从而保证活塞运动时活塞与气缸套之间完全没有固体滑动摩擦接触。

该机构对传统气缸机构采用的滑动导向结构和胶圈密封做了改变，采用空气静压轴承直线运动导向代替传统的滑动导向，采用间隙密封代替了传统的胶圈密封，从而极大地降低了活塞运动时摩擦干扰力对运动精度的影响，提高气缸作用力的准确和精密控制。

2.1.4　空气静压润滑气缸特性试验验证

空气静压轴承采用空气作为润滑介质，摩擦因数很小，正常情况只有滑动摩擦因数的千分之一左右，且空气静压润滑摩擦因数随着运动速度变化不大，静止或不同运动速度下摩擦力可以保持基本恒定。

重力平衡状态下，理论上空气静压轴承导向气缸的摩擦阻力只有数克左右；所以，空气静压轴承导向气缸可以实现气缸运动时基本恒定的推力控制，实现气缸的精密平衡控制。

空气静压轴承平衡气缸研制实例：承重指标 150kg，行程 220mm，缸体内径 100mm，活塞杆直径 60mm，导向空气静压轴承供气压力为 0.4MPa。实际测量结果为：承载可以在 200kg 内任意调节，在气缸运动时处于完全浮起状态，无固体接触摩擦阻力，低速运动时阻力小于 20gf，比传统气缸能够实现的运动阻力小一个数量级以上。分析认为，残留

的20gf不恒定力是由于气体调压阀在气体流量变动情况下压力不恒定造成的。改善调压阀的稳压性能，平衡精度可以进一步提高。

将该平衡气缸用于自行研制的某大型立式超精密加工机床 *Z* 轴滑台重力平衡，参见图2－4，该机床 *Z* 轴滑台为液体静压导轨运动，直线电机驱动。应用空气静压润滑平衡气缸后，*Z* 轴滑台实现了纳米级的微位移运动分辨率和0.1μm级运动直线精度；证明了空气润滑平衡气缸在超精密加工机床上具有理想的性能和应用价值。

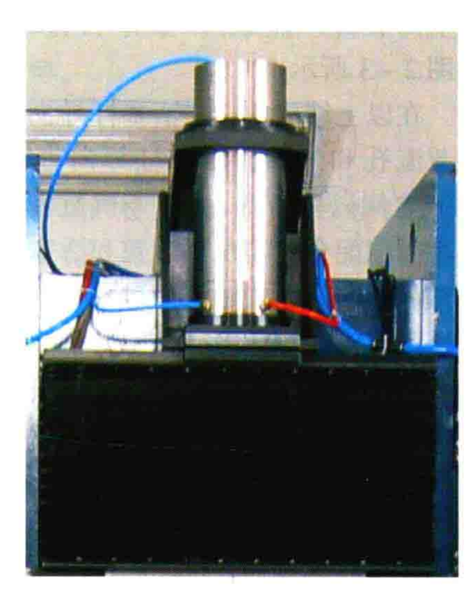


图2－4　静压气缸在大型超精密加工设备上的应用

2.2　套装空气静压轴承行星运动机构

2.2.1　套装空气静压轴承行星运动机构在超精密机床中的应用背景

超精密切削加工普遍使用单晶金刚石刀具，而单晶金刚石刀具刃磨机床也是一种典型的超精密加工机床。在圆弧刃单晶金刚石刀具刃磨机床中，需要砂轮做行星运动，且该行星运动需要很高的运动精度和运动平稳性；这是由于单晶金刚石的各向异性，需要不断改变单晶金刚石刀具磨削的切削速度方向，在磨削中必须严格控制砂轮振动和磨削力的变化；砂轮做行星运动过程中，磨削点必须始终严格处于同一个平面内。磨削中的振动或砂轮运动轨迹不在一个平面内，都不能获得理想的刀具刃口锋利度和刀具轮廓精度。

为了使单晶金刚石刃磨机床获得高精度高平稳性的砂轮行星运动，需要在磨刀机上采用空气静压轴承技术实现行星运动方式。目前国外的单晶金刚石刀具刃磨机床，例如英国科邦（Coborn）公司的PG3B单晶金刚石刃磨机床，砂轮主轴和刀具回转轴都采用了空气静压轴承，而砂轮行星运动轴采用了密珠轴承。密珠轴承的运动精度和平稳性比空气静压轴承仍有差距，如果将密珠轴承换为空气静压轴承，将可以进一步提高机床的运动精度和平稳性。

2.2.2　套装空气静压轴承行星运动机构应用分析

行星运动是机床等机械设备中经常采用的一种复合运动方式，有各种方式实现这种运动形式，通常情况并不要求行星运动机构实现很高的运动轨迹精度；在有些场合需要行星运动具有很高的运动精度。例如圆弧刃单晶金刚石刀具刃磨机床中，需要砂轮端面按照行星方式运动，而砂轮端面跳动要求亚微米级；这种运动精度采用传统滚动轴承方式很难达到。采用将两个高精度空气静压轴承按照轴线平行而偏离一定距离的方式内外套装组合，用以实现高精度的行星运动，达到机床设备的运动精度要求。

空气静压轴承的运动精度（径向跳动、轴向跳动和旋转轴线空间角摆误差等）一般比传统机械轴承的精度高一个数量级；将两个空气静压轴承内外套装，并将两个轴承旋转轴线调整至严格平行；当内外旋转轴同时旋转运动时，可以实现很高精度的行星运动。如

果将内轴上安装端面砂轮磨盘，砂轮磨盘做行星轨迹运动时，砂轮端平面可以实现很高的端面跳动精度。这种高精度的行星运动对单晶金刚石刀具刃磨等机床是十分关键和必要的。该机构原理示意图见图 2－5。

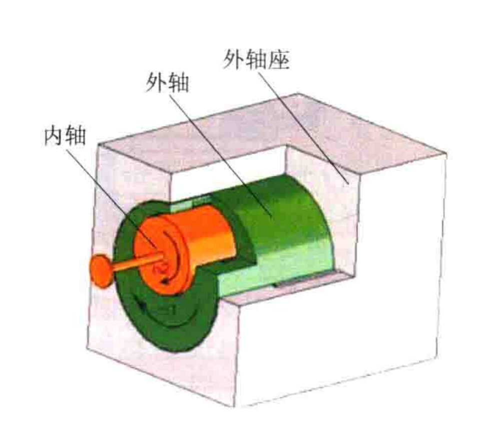




图 2－5　套装空气静压轴承行星运动机构原理及实物图

在该结构中，通过外轴座供气实现外轴座和外轴之间空气静压轴承，通过外轴供气实现外轴和内轴之间的空气静压轴承；外轴轴心和内轴轴心相距一定距离，并且使两个轴心线保持严格平行，当内轴以转速 n_1 运动，外轴以转速 n_2 运动时，由于外静压轴承和内静压轴承都可以实现很高的回转运动精度，且两个回转轴线严格平行，所以可以实现超高精度的行星运动，即内轴轴线在自转和公转的组合运动时，其回转轴线空间角摆和轴向跳动误差很小。

该模块实现复杂运动轨迹的超高精度运动，是一种新型工作原理的行星运动机构；这种新方法的采用，能够获得超高精度的行星运动；它与传统的采用滚动轴承的行星运动机构相比精度提高效果十分显著，达到的运动精度是传统方法无法比拟的。

2.2.3　套装空气静压轴承行星运动机构实施方案

在本项机构中包含内空气静压轴承和外空气静压轴承，套装的气体静压轴承行星运动机构结构图见图 2－6。该机构中，内轴、内轴套和内轴止推板等零件构成完整的内空气静压轴承，该内轴承由内轴驱动电机直接驱动实现高速旋转。由外轴、外轴套和外轴止推板等零件构成完整的外空气静压轴承，该外轴承由其他减速驱动装置驱动低速旋转。内静压轴承安装在外静压轴承的外止推板端面上，构成内外套装的空气静压轴承。

该机构中需要严格保证内外静压轴承回转轴线的平行。此外，应严格保证内、外静压轴承安装面的端面跳动精度，一般此项精度控制在数微米以内。为进一步提高两回转轴线的平行精度，该结构中设计了靠弹性变形的方式调整两回转轴线的平行精度，即在外轴的后端面设有一个拉环，该拉环可以对内轴套施加一定的作用力，由于内静压轴承是前端安装固定，所以内静压轴承后端受力时可使其主转轴线产生微量偏转，借此实现调整内、外静压轴承回转轴线的平行精度。靠此方法的调整量应十分微小，否则会影响内静压轴承的正常工作。

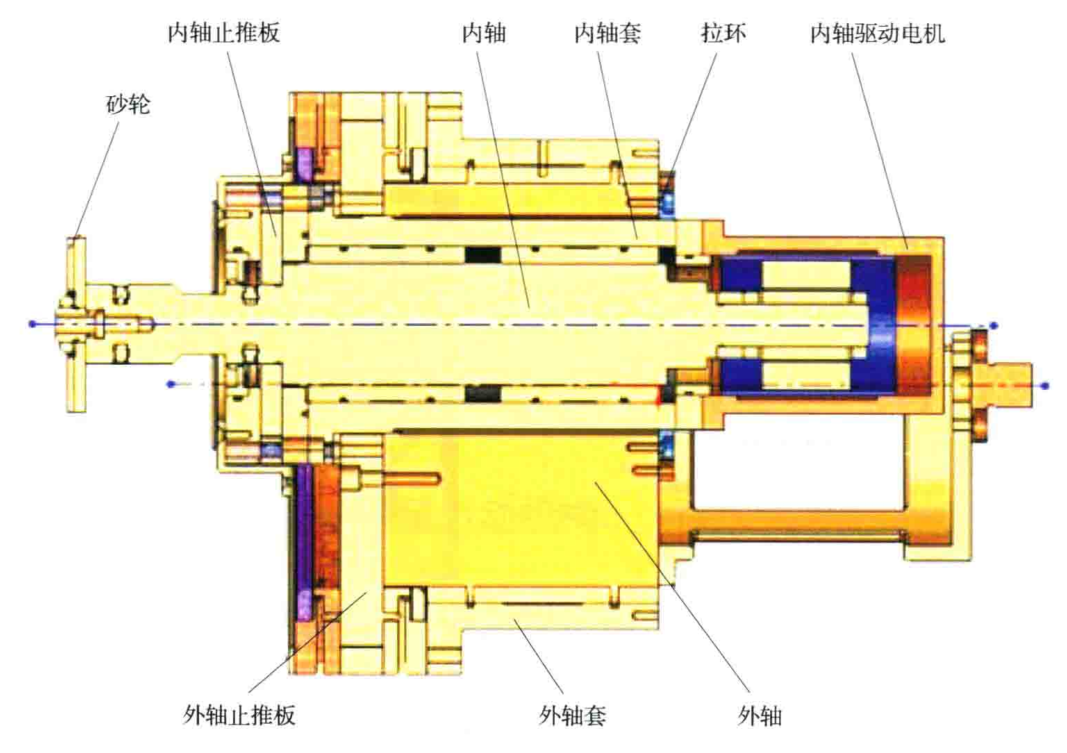


图 2-6　套装空气静压轴承行星运动机构结构图

内静压轴承的工作需要压缩空气、驱动电力，高速驱动电机还可能需要循环水冷却；由于内旋转轴在外旋转轴之内旋转，所以需要解决内旋转轴所需的压缩空气、驱动电力和冷却水等的输送；需要经过外旋转轴输入内旋转轴；为此，需要在外旋转轴的旋转轴上加装旋转接头用以输送压缩空气和冷却水，还需要加装旋转滑环用以输送电力。

2.2.4　套装空气静压轴承行星运动机构运动精度试验验证

传统的滚动轴承运动跳动精度一般大于 1μm，而空气静压轴承的运动跳动精度可以达到 0.1μm 以下，相差一个数量级；所以，采用两个空气静压轴承套装后的行星运动机构能够达到的运动精度，比采用传统滚动轴承的行星运动机构能够达到的运动精度高将近一个数量级。

套装空气轴承行星运动机构做行星运动时，回转轴线空间运动角摆精度小于 0.3″；将直径 100mm 的砂轮安装于内轴端面上，砂轮做行星运动时砂轮端面跳动小于 0.3μm；这样高的精度是采用传统滚动轴承的行星运动机构很难达到的。采用套装空气静压轴承行星运动机构的单晶金刚石刃磨机，可以刃磨刃口轮廓波纹度小于 0.05μm 的理想刃口，见图 2-7。

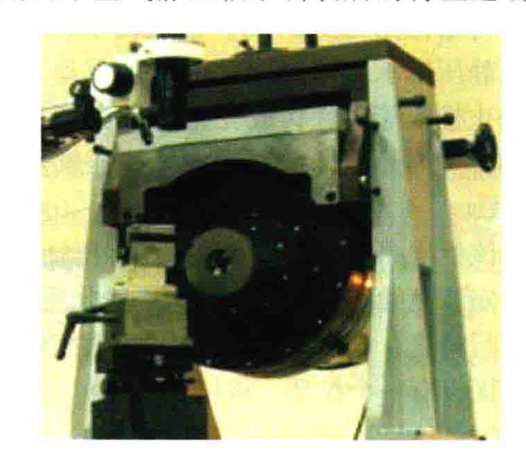


图 2-7　套装空气静压轴承行星运动机构在圆弧刃金刚石刀具刃磨机上的应用

2.3　超精密位置伺服控制主轴 *C* 轴及 *B* 轴

2.3.1　背景

复杂光学曲面或具有微结构特征的零件由于其独特的光学特性或其他性能近年来受到重视，于是对超精密加工设备和工艺提出了新的需求。传统的二轴超精密车床只能加工回转对称的非球面类零件，为了加工形状复杂的特征，需采用四～五轴超精密切削加工设备（参见图 2－8）或者采用快速刀具伺服加工技术及慢拖板伺服加工技术，无论哪种方式，这类设备的最大特点是超精密加工设备的工件主轴不再是做单纯的回转，而是需要对其角向位置进行精确控制，我们称之为超精密车床的 *C* 轴。同时在加工复杂形状零件时刀具也需要进行高精度摆动，此时将刀架固定在一回转工作台上，我们称之为超精密车床的 *B* 轴，如图 2－9 所示。



图 2－8　五轴超精密加工设备结构示意图

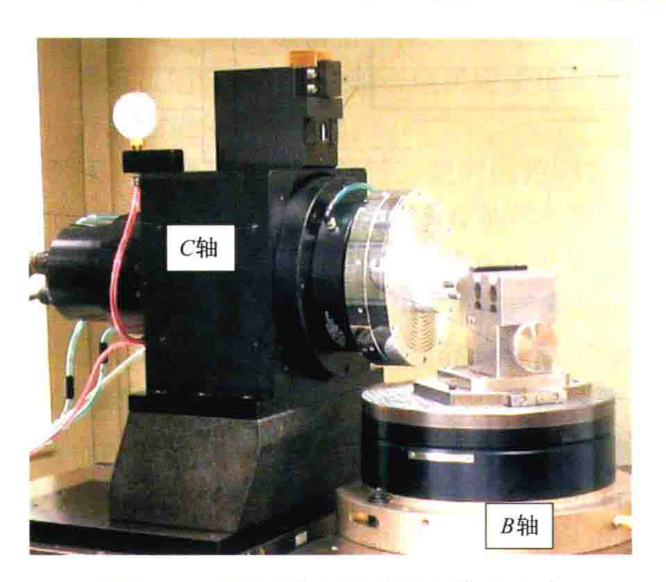


图 2－9　超精密车削机床的 *B* 轴和 *C* 轴

2.3.2　超精密车床 *C* 轴的特点及设计

超精密车床的 *C* 轴首先必须具有极高的回转精度和较大的刚度，同时要求兼顾以下两种功能：一是在加工回转对称的特征时，需要其高速回转；二是在加工非回转对称特征时需要其具有很高的位置跟踪精度，而此时速度可以较低。因此目前国内外超精密车床的 *C* 轴均采用空气静压轴承结构。

空气静压主轴已经是一项很成熟的技术，具有回转精度高、结构相对简单、对环境无污染等特点，但是承载及刚度相对较小，在一定程度上限制了其应用范围。通过以下两条

措施在不增加结构尺寸的前提下可以提高空气静压主轴的刚度。

（1）改变节流方式

多孔质材料通常由金属或者非金属小颗粒烧结而成，压缩空气经颗粒间间隙流至轴承工作面而造成压力降的节流装置称为多孔质节流器。与常用的小孔节流方式相比，多孔质空气轴承的气体供给是通过整个轴承气浮面的无数个小孔。由多孔质节流材料组成的气体静压轴承具有承载能力高、刚度高、阻尼大、结构简单等特点，但由于材料的原因，要保持定渗透率难度很大，所以压力分布很难控制，而且多孔质材料加工时孔隙易堵塞，这在一定程度上都限制了多孔质节流空气静压轴承的应用。

（2）改变主轴的结构形式

一般空气静压主轴的轴向止推轴承布置有两种结构形式，在主轴前端或在主轴尾端，如图 2－10 所示。两种结构各有优缺点：当止推轴承设置在主轴靠近工件装夹盘一端时可有效降低热膨胀伸长带来的工件定位误差，但是由于主轴的角刚度主要是由径向轴承决定的，所以此时由于主轴前端悬臂加长使得主轴角刚度有所降低；反之若将止推轴承设置在靠近主轴驱动电机一段即尾端，则主轴角刚度提高的同时由于温度变化引起的主轴前端伸缩量加大，从而最终影响车床的加工精度。

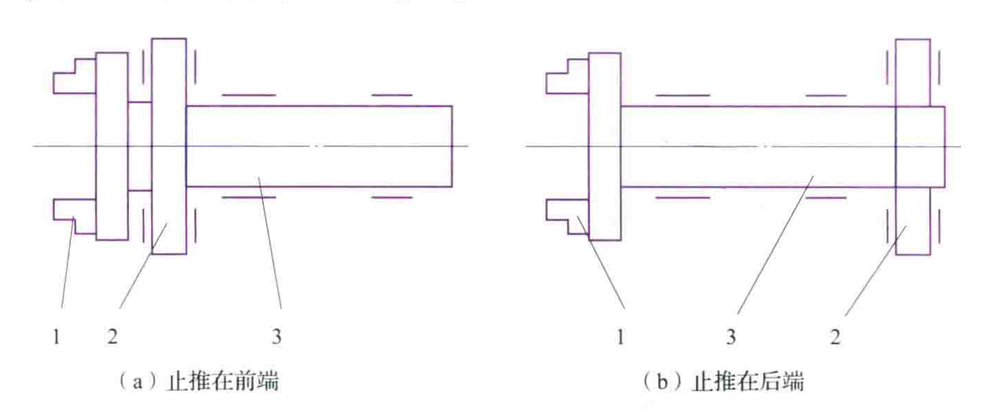


图 2－10　空气静压主轴的两种结构

1—工件安装卡盘；2—轴向止推轴承；3—径向轴承

为此综合考虑上述两种结构的特点，设计时可采用特殊的布置方式，即止推轴承布置在轴承中部，如图 2－11 所示。这种结构具有以下特点。

①在同样的轴向尺寸条件下，由于前后轴承支撑点的跨距加大，所以这种结构的主轴角刚度都大于上述两种结构，同时由于对称结构使得主轴的运动稳定性也大大提高。

②止推轴承在主轴中部位置，由于温度变化引起的主轴前端伸缩量与图 2－10（b）结构相比减小，但与图 2－10（a）结构相比略有增加。由于超精密主轴的使用环境温度控制较为严格，工作过程中主要发热量来自主轴本身的电机。主轴设计中电机外壳采用了恒温水冷装置减小了电机线圈发热的影响，同时在电机与主轴后轴承之间通一路冷却空气形成一层隔热气膜以减小电机转子发热的影响，这样可以有效地控制主轴前端的伸缩量，保证使用要求。

超精密空气静压主轴的驱动方式有直驱式和通过联轴节驱动等方式，其中电机通过联轴节与主轴连接的方式虽然能有效隔绝电机运转产生的振动和发热、减小了电机对主轴精度的影响，但是这种驱动方式并不能用于超精密车床的 C 轴，主要原因是由于电机与主

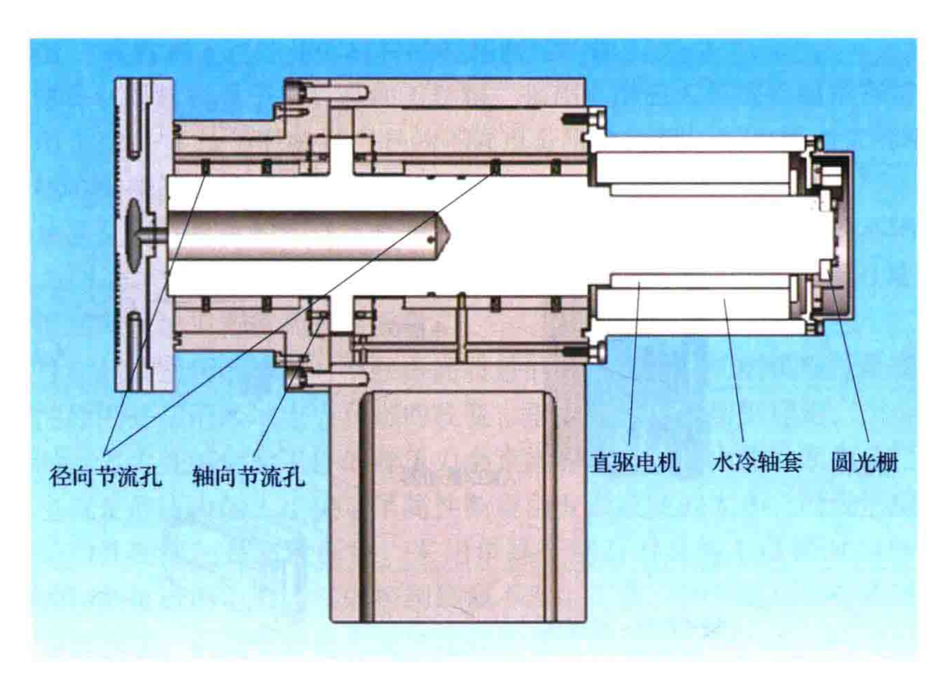


图 2－11　止推中置式空气静压主轴结构

轴之间的联轴节的存在会在驱动元件（电机）与执行原件（主轴）之间引入中间非线性环节，无法进行精确的位置控制。所以超精密车床 *C* 轴均采用类似电主轴的直驱方式，即选择分体式伺服电机，将电机的转子压入主轴、电机定子压入外套，电机直接带动主轴旋转，这种驱动方式可以有效地避免上述问题。

前面提到，超精密车床 *C* 轴既要求高速旋转，此时的控制方式是速度模式；同时又要求高精度的定位，而此时的控制方式是位置模式。*C* 轴的位置反馈一般都采用圆光栅，由于光栅读数头的输出分辨率与被测物体的旋转速度成反比，作为伺服轴进行位置控制时对其速度无很高的要求，但分辨率要求较高，可以选择精度较高的细分盒读取位置信号，但进行回转特征超精密车削加工时采用速度模式，其转速较高，高精度的细分盒无法准确读取速度信号，因此需选择两套不同精度的细分盒，分别满足高速与高分辨率的要求。作为伺服轴位置控制时满足分辨率的同时尽量增大旋转速度；作为回转轴时满足速度的同时尽量增大分辨率，*C* 轴的控制原理如图 2－12 所示。

此外，近年来水静压轴承在超精密机床中的运用取得成功，例如日本 SSi 公司研制的三角棱形立式结构的超精密磨床中采用了去离子水静压轴承。这种轴承与空气静压轴承相比刚度及承载更大、阻尼更好，与油静压轴承比较其优点是不易对环境造成污染，另外水的黏度远低于油，因此水静压轴承发热较小，适合用于高速运转的工件主轴。

2.3.3　超精密位置伺服控制主轴 *B* 轴

在复杂曲面类零件超精密切削时，根据机床不同的结构特点可以采用不同的加工工艺，一是利用两轴（直线轴 *X* 轴及 *Z* 轴，简称 *XZ* 方式）数控超精密机床结合圆弧刃刀具，用刀具上不同的点加工形成被加工表面；二是利用三轴（直线轴 *X* 轴及 *Z* 轴、回转工作台 *B* 轴，简称 *XZB* 方式）数控设备，用刀具上固定的点加工形成被加工表面，如图 2－13 所示。

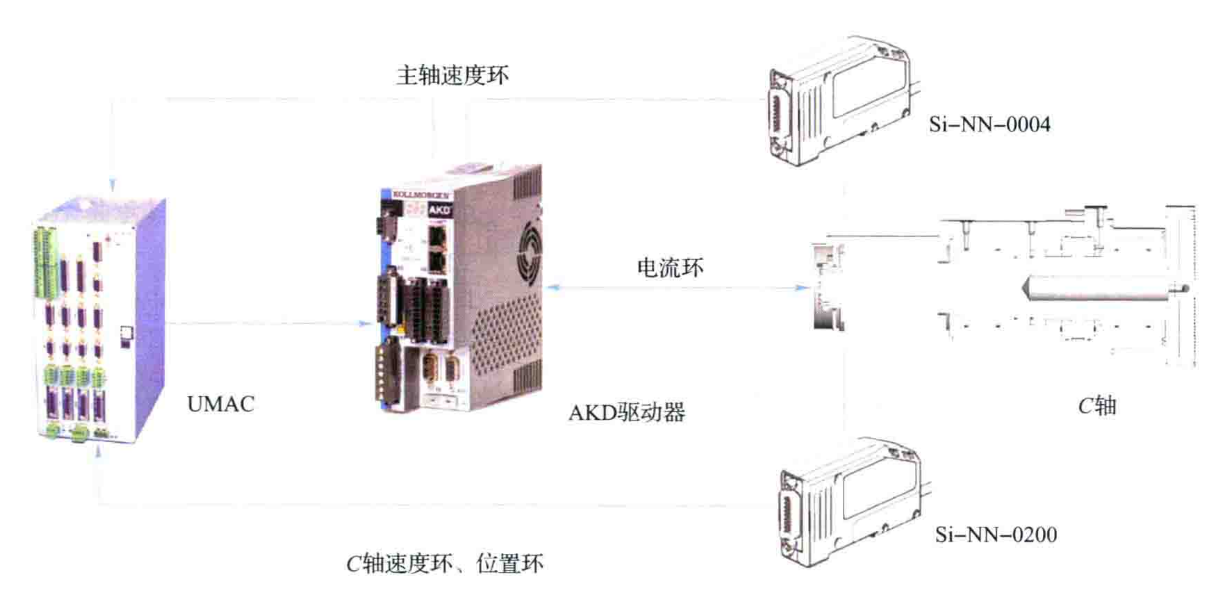
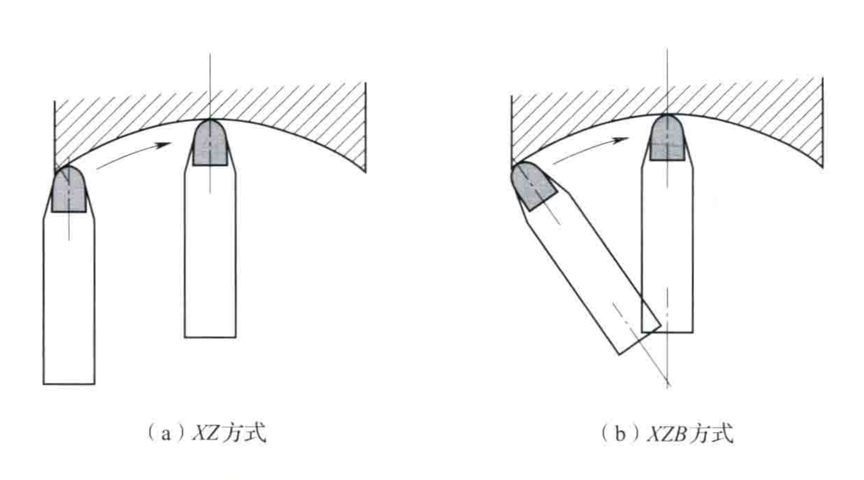


图 2-12　双读数头超精密 C 轴控制原理图



（a）XZ方式　　（b）XZB方式

图 2-13　超精密切削表面形成机理

2.3.3.1　采用基于 B 轴进行超精密切削加工时的特点

当采用 XZ 方式加工曲面类零件时需要用高精度（波纹度）的圆弧刃金刚石刀具，刀具圆弧刃的波纹度直接影响到工件的表面形状误差。采用 XZB 方式加工时，需要一台带有 B 轴的金刚石车床，将刀具中心作为回转中心点，使刀具和被加工面法向量始终处于同一角度关系，刀具上的同一点接触于工件表面，用这种方式加工时金刚石刀具的圆弧刃波纹度不会影响到工件的表面形状误差。

B 轴在超精密数控金刚石车床上的应用也经历了较复杂的过程，最初由于高精度圆弧刃金刚石刀具的精度低、价格高，在超精密车床上增加高精度的 B 轴可以提高零件的加工精度；随着圆弧刃金刚石刀具技术的发展，在满足加工精度的前提下金刚石刀具的价格优势令 B 轴的需求曾经一度减少；但是随着数控技术的发展以及刀具轨迹规划的发展，特别是为了满足加工一些特殊材料或特殊形状零件方面的需求，使得 B 轴在应用上及成本上的优势进一步体现。

（1） *XZB* 方式有利于红外晶体材料的超精密切削加工

①硅、锗等红外材料属于硬脆难加工材料，采用金刚石刀具进行超精密切削时刀具磨损较快。采用 *XZB* 方式加工时选择刀具的不同点分别作为粗加工和精加工的部位，与 *XZ* 方式加工相比极大地提高了同一把刀具的耐用度。

②由于单晶金刚石材料的特点，金刚石不同晶向造成了圆弧刃刃口的不同部位硬度不一致，使用 *XZB* 方式加工，用户可以在刀具有效角度范围内，自由选择刀具切削部位的晶向，从而提高零件加工精度和表面质量。

③脆性材料超精密切削加工时要获得高质量的加工表面，切削机理应是塑性去除。材料脆塑转变的原因是切削区域应力状态的改变，根据材料塑性切削理论，当金刚石刀具加工硬脆材料时，刀尖处施加给工件的静压力会直接影响工件发生脆性断裂前已产生的塑性变形情况，也就是静压力的大小决定了脆性断裂前变形应变的大小，而变形应变的大小又决定了材料是塑性变形还是脆性断裂。采用单晶金刚石刀具加工硅锗时均采用负前角刀具，可以增大切削区域的应力，有效控制裂痕不发生扩散，并且能提高单晶硅发生脆塑转变时的临界切削深度，从而更好地实现单晶硅的塑性域切削。

使用 *XZ* 方式加工时，由于工件和刀具的接触点会随着工件表面形状的变化而变化，刀具的实际前角会发生变化，有效负前角的变化会增大材料脆性断裂的可能，导致加工零件表面粗糙度变差以及亚表面损伤。而采用 *XZB* 方式加工时，可以允许选择一个最佳和恒定的负前角来完成整个切削过程。

（2） 采用 *XZB* 方式可以进行高陡度曲面的加工

各种类型光学元件及模具超精密切削加工时，由于圆弧刃刀具具有精度的圆弧包角有限，使用 *XZ* 方式加工时不可能加工陡度很高的表面或者具有很大变化的局部坡度的表面。而采用 *XZB* 方式加工则可以使刀具根据被加工表面曲率的变化跟踪旋转，使刀具上的同一点始终与被加工表面接触从而完成高陡度曲面的加工。

（3） 提高金刚石的利用率、降低成本

采用 *XZB* 方式加工消除了刀具圆弧刃波纹度对工件形状精度的影响，降低了对金刚石刀具的要求；同时对于同一把刀具用不同的切削刃区域同时完成“粗加工”和精加工，从而节省了刀具更换及调整的时间；当一个位置的切削刃磨损后可以通过 *B* 轴将刀具旋转至一个新的位置调整刀具与工件的接触点继续进行切削加工，从而大大提高了刀具的利用率，降低了金刚石刀具的成本。

（4） 能满足高效率衍射光学元件的高效超精密切削加工

为了提高衍射光学元件的效率，应使衍射面之间的过渡区域尽可能小，如图 2－14 所示为金刚石刀具切削时由于刀具半径的限制产生的加工死区，从而导致衍射面减小、损失率增大。从图中可以看到，尽可能采用小的刀具半径以减小加工死区从而将损失率控制在一个可接受范围内。但是为了在反射面上获得较好的表面粗糙度，必须降低进给速度，从而在很大程度上限制了加工速度。如果采用 *XZB* 方式加工结合特殊的金刚石刀具可以提高衍射光学元件的加工效率，这种刀具的切削刃部分由大半径圆弧区域和微小圆弧过渡区域组成，使用大半径圆弧区域快速加工，当接近衍射过渡带或衍射环时，利用 *B* 轴转动刀具，使微小圆弧部分和工件接触进行加工，这样就可以在过渡带上留下极小的圆弧，大大减小了加工死区，同时又保证了较高的加工效率。

（5）将 B 轴作为一个刀塔使用可以提高生产效率

如图 2－15 所示的为美国 Precitech 公司生产的 NanoForm 250 上布置的 B 轴，在 B 轴台面上有足够的空间布置各种附件，主要包括：五把金刚石刀具、轴向对刀测头、在线测量装置以及调心附件等。当加工中需要使用不同的刀具或刀具磨损时可以快速地切换到已经调整好的刀具。这种布置方式特别适合小批量复杂零部件的加工，可以极大地提高生产效率。

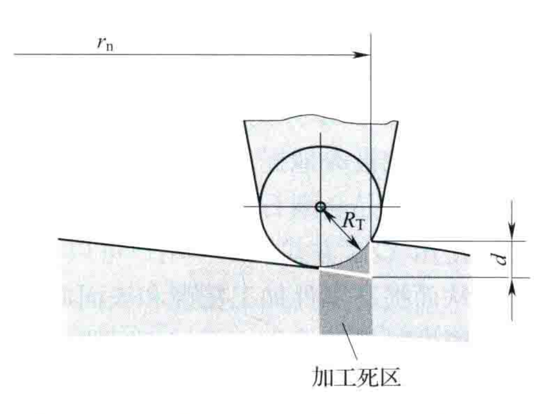


图 2－14　衍射光学元件的超精密切削加工

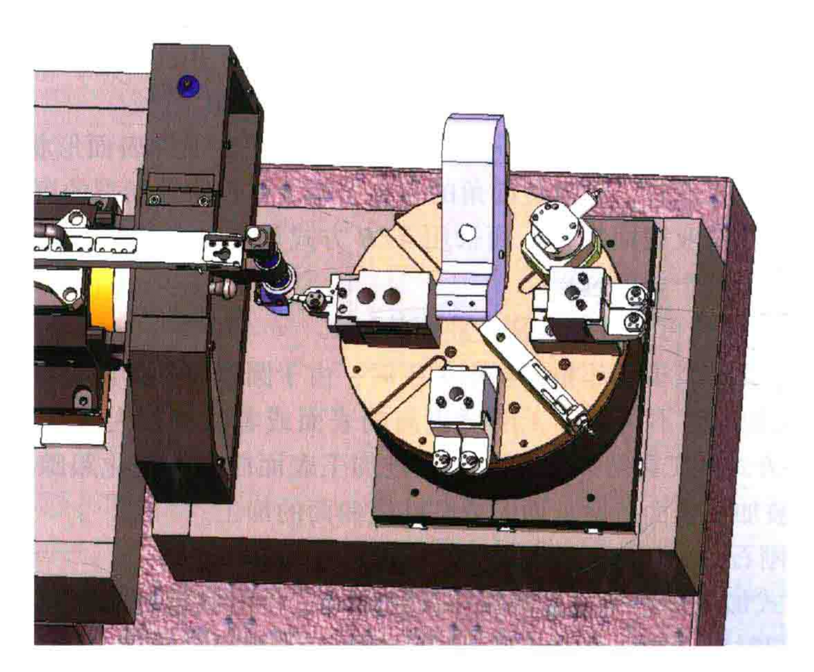


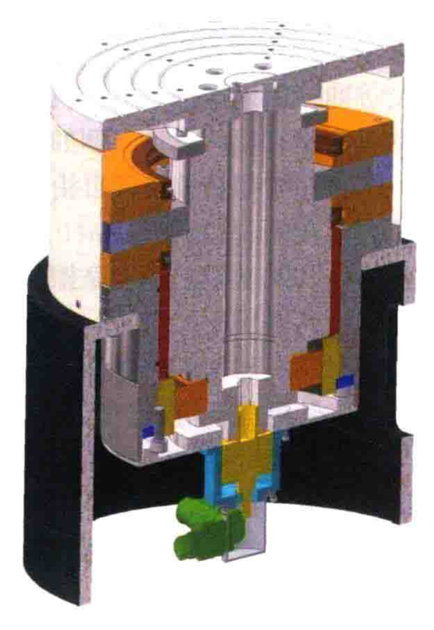
图 2－15　超精密切削机床的 B 轴布置

2.3.3.2　超精密 B 轴的应用

超精密加工设备的 B 轴转台要求具有极高的回转分辨率、回转精度和运动平稳性，考虑 B 轴转台还需具有良好的刚度特性和阻尼特性，根据使用场合不同可采用液体静压结构或者空气静压结构，一般在用作加工时采用液体静压结构，而作为检测仪器时采用空气静压结构。同时为满足机床动静态性能要求，其高度要尽可能低。超精密 B 轴一般采用分体式力矩电机直接驱动，高精度圆光栅进行位置测量反馈，如图 2－16 所示。

在使用 XZB 方式加工时，为了使刀具能够正交切削，需要使用机械调整的方式将圆弧刃金刚石刀具的圆弧中心与转台中心重合，通常这种刀具的设定方式需要耗费数小时，虚拟中心技术（Virtual Centric Technology，VCT）可以有效地解决这个问题。

所谓虚拟中心技术 VCT 是指用户将刀具置于偏离实际 B 轴中心位置进行正交切削，一旦使用光学对刀仪等确定刀具位置后，通过虚拟中心软件及机床控制系统使用 X 轴和 Z 轴的线性位移来补偿刀具旋转，所以刀具使用时和其安装在 B 轴中心是一样的。虚拟中



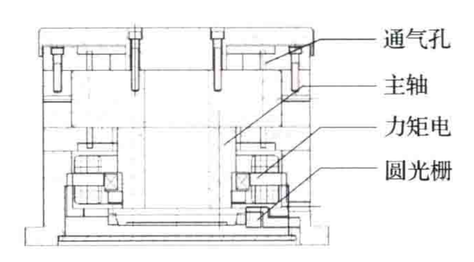




图 2－16　典型超精密 B 轴结构示意图

心软件在后台工作，使用时不需要对刀具路径做任何修改。在正交加工中，虚拟中心可以选择刀具边缘、刀具中心或刀具边缘上的任意点作为旋转中心，VCT 也可应用于磨削砂轮或铣削工具。

从理论上说刀具偏离回转中心的偏移量是无限的，但是当偏离量增加可能会超过线性轴的移动限制，所以实际使用时需要考虑 X、Z 轴的行程以确定偏移量。当加工大直径或凹曲面时，由于工件会和 B 轴台面产生干涉而无法直接使用 XZB 方式加工，或者需要特殊设计专用工装夹具才能采用该方式进行加工，而采用 VCT 后可以大大缩短夹具的长度。工件的安装位置越接近主轴鼻端，系统的刚度越好，对提高加工精度和表面质量非常有利，尤其是对于硅、锗等难加工材料更是如此。

如图 2－15 所示的刀具安装位置超过了 B 轴台面的边缘，既可以利用 VCT 进行 XZB 方式加工，也可以进行传统的 XZ 方式加工。

2.4　基于直线电机驱动的液体静压导轨及附件

2.4.1　概述

从国内外超精密加工设备中元部件的统计来看，20 世纪 80 年代广泛采用空气静压技术，它具有精度高、摩擦发热少、驱动功率小、无污染等特点，但刚性低、动态特性差是其缺点，一般多用于中小型超精密车削机床以及超精密测量仪器。

液体静压轴承与空气静压轴承在性能上有明显的差别，液体静压轴承的优点是承载大、刚性高，对振动的衰减性也高。由于液体相对于空气具有较大的阻尼率，且超精密加工一般切削力都较小，所以高阻尼及动态性能有助于获得良好的表面粗糙度。不论是磨削、车削，研磨设备上液体静压轴承都得到了越来越多的应用。但液体静压轴承也有一些缺点，如需要考虑回收、容易对环境造成污染，特别是在高速运动时容易产生发热，需要

外加冷却系统等，所以目前一般都用于超精密加工机床的导轨。

精密滚珠丝杠是超精机床之前通常采用的驱动方法，但丝杠的安装误差、丝杆本身的弯曲、滚珠的跳动及制造上的误差、螺母的预紧程度等非线性因素都会给导轨运动精度带来影响，不能实现超高精度的定位。通常超精密传动机构应有特殊设计，例如丝杠螺母与气浮平台的联接环节保证轴向驱动刚度高，而水平、垂直、俯仰和偏转四自由度为无约束的机构，电机与丝杠的联接环节也应采用纯扭矩无反向间隙的联接器。

气体静压丝杠和液体静压丝杠可进一步减小滚珠丝杠的跳动误差和因摩擦和反向间隙引入控制系统的非线性环节。目前市场上已经有成熟的液体静压丝杠产品，例如德国海孚乐（Hyprostatik）公司生产的静压丝杠直径 40 ~ 225mm，最高加速度可达 10g，最高速度可达 120m/min，最大轴向载荷 120t，最大长度可达 5m，已应用于精密磨床等设备，具有极佳的减振性能。

摩擦驱动技术广泛用于精密机构的传动中，是因为摩擦驱动具有运动平稳、无反向间隙等特点。一些超精密机床及测量机构要求超低速高分辨率，并且一般都是轻载的，非常适合使用摩擦驱动方式。

直线电机驱动适合于高速和高精度的应用场合，通常高速滚珠丝杠可在 40m/min 的速度和 0.5g 加速度情况下工作，而直线电机加速度可达 5g，其速度和刚度都分别可大于滚珠丝杠的 30 倍和 7 倍。目前超精密切削加工设备导轨驱动大都采用直线电机加光栅测量进行位置闭环反馈，由于这种驱动方式是直接驱动，结构简单，只产生直线运动，没有扭矩的产生，受外界条件限制小，因此可以得到较高分辨率的直线运动参数，如图 2 - 17 所示为两种典型的基于直线电机驱动的液体静压导轨。美国摩尔公司、Precitech 公司生产的超精密加工设备均以采用了直线电机驱动的液体静压导轨，最高的定位分辨率达到了 86×10^{-12}m。

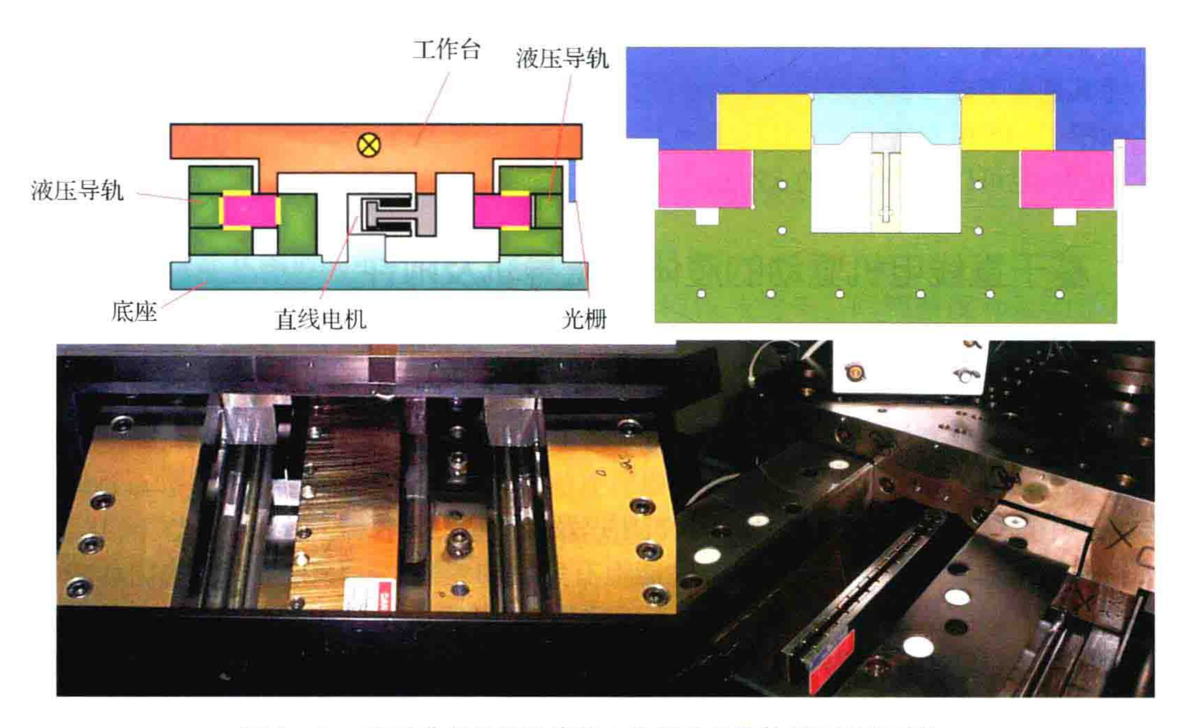


图 2 - 17　两种典型的基于直线电机驱动的液体静压导轨结构

2.4.2 小流量流体液体静压导轨的设计

2.4.2.1 小流量液体静压导轨的特点

液体静压导轨的节流方式主要有小孔节流、毛细管节流以及薄膜反馈节流等形式，其中小孔节流是最常见的一种方式。国内研制的小孔节流型液体静压导轨的单边设计间隙均在0.02～0.03mm，节流小孔的直径在0.3～0.5mm，导轨的液体介质流量较大。液体静压导轨需要配备相应的供油系统，供油系统的供油压力一般为2～3MPa，流量为8～12L/min。

温度的变化对导轨的运动精度影响很大，所以除了控制环境温度外还必须控制导轨液压油的温度。目前液压导轨供油系统一般采用定量泵供油，通过溢流阀调节供油压力及流量，所以供油系统均配备恒温控制系统，以消除由于溢流作用及导轨的节流作用产生的温升。整套液压供油系统结构复杂、噪声大、能耗大，既不符合绿色环保的理念，同时供油系统本身的发热也会对超精密加工环境产生不利的影响。

正是基于上述背景，提出了小流量液体静压导轨的设计理念。在传统的液压导轨结构参数设计时会考虑到如果选取过小的节流孔直径或导轨间隙可能引起堵塞或卡死，从而影响导轨的运行可靠性，但近年来随着零件加工精度的提高和供油系统过滤精度的提高，减小导轨的节流孔直径及导轨间隙而又不至于影响导轨的运行可靠性成为可能，从而最终减小了导轨的流量。

由于液体静压导轨间隙及流量的减小，给导轨结构设计带来了很多益处：

①同样的结构尺寸，导轨的刚度可以增大，或者说要达到同样的刚度，导轨的结构尺寸可以减小；

②要达到同样的刚度可以降低供油系统压力，从而可以减小导轨结构件由于油压产生的变形，有利于导轨精度的提高；

③由于导轨流量和供油压力减小，可以降低对供油系统的要求。

2.4.2.2 液压导轨设计及调试中需要注意的问题

（1）液压导轨的刚度与整台超精密加工设备的匹配问题

液体静压导轨主要应用于超精密加工机床，导轨的精度和刚度是首先要考虑的问题。虽然通过结构参数设计可以进一步提高导轨的刚度，但是液体静压导轨作为超精密机床的一部分必须要从系统上考虑设备的综合刚度。超精密加工设备整个环节中最薄弱的环节是空气静压主轴，由于其刚度与液压导轨相差较大，所以一味地提高导轨的刚度对设备的综合刚度的提高贡献不大，适当降低液压导轨刚度的要求，可在设计时进一步减小结构尺寸或者降低供油压力，使导轨结构设计更加紧凑，同时结构变形减小，易于保证导轨精度。

（2）油腔压力测试验证设计合理性

虽然经过理论计算得到的导轨结构参数（主要包括导轨间隙和节流孔直径）是最优的，但是由于加工及装配过程中的误差使得导轨的工作状态发生了一定的改变，为此在装配调试过程中需要进行对参数设计合理性的验证，也就是需要测量实际的节流比（导轨油腔压力与入口压力的比值，最佳值应为0.707）。为此在导轨结构设计上预留了油腔压力测试接口，如图2-18所示，通过更换节流孔或改变导轨间隙可以保证装配后的节流比为最佳值，一般通过更换节流孔更加方便。

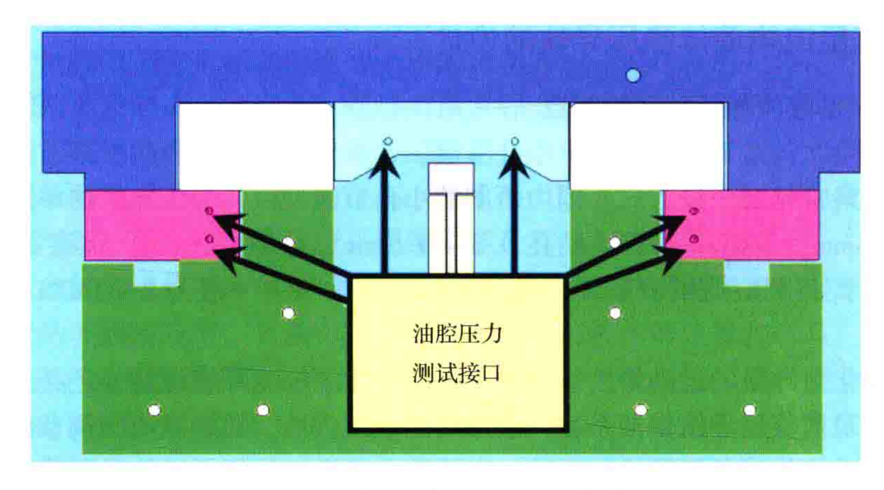


图 2－18　液压导轨油腔压力测试接口

（3）节流孔更换方便，提高可维护性

前面提到导轨装配调试过程中需要通过更换节流孔调节节流比，同时由于小孔节流对供油的洁净度要求较高，特别是小流量液体静压导轨其节流孔的直径更小（0.1～0.2mm），如果供油系统滤芯更换不及时或受到外界污染，使用一定时间后节流小孔可能堵塞，影响导轨的正常使用。这时需要重新拆卸导轨，清洗之后重新安装调试，造成工作量大，可维护性极差。为此在液压导轨结构设计时需要节流孔可以在外面拆卸而不需要装拆导轨，如图 2－19 所示。更换或清洗节流孔时只需要将外部油路的堵头拆卸后即可方便地将节流孔拆除。

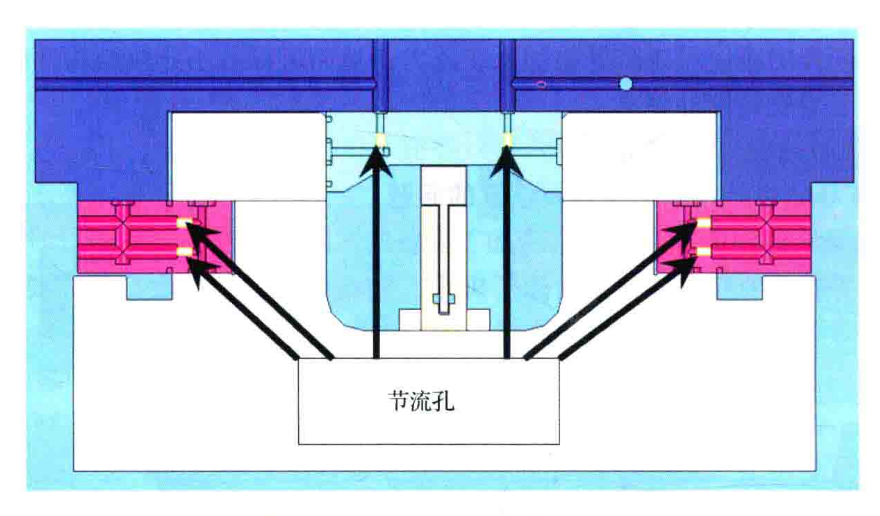


图 2－19　节流孔的可更换设计

（4）位置测量反馈光栅的安装

液压导轨的位置检测反馈控制目前一般采用光栅，为了保证导轨的定位精度，光栅尺的材料采用零膨胀铟钢或玻璃材料以减少温度变化的影响。但是由于光栅尺是安装在液压导轨的铸铁工作台上，如果不采取特殊的安装方式，工作台的膨胀同样会引起光栅尺的伸长从而影响导轨的定位精度，所以光栅尺可采用如图 2－20 的安装方式。将特殊设计的光栅安装铟钢座固定在铸铁工作台上，光栅尺安装在铟钢座上，具体原理如图 2－21 所示。

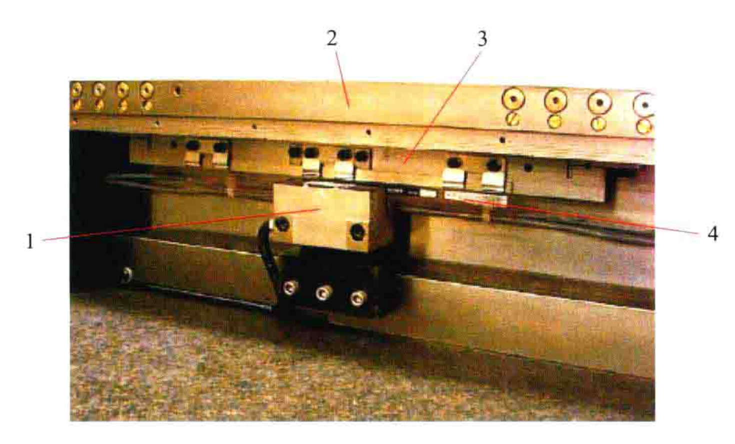


图 2－20　液压导轨中位置测量光栅的安装

1—光栅读数头；2—铸铁工作台；3—光栅安装铟钢座；4—零膨胀玻璃光栅尺

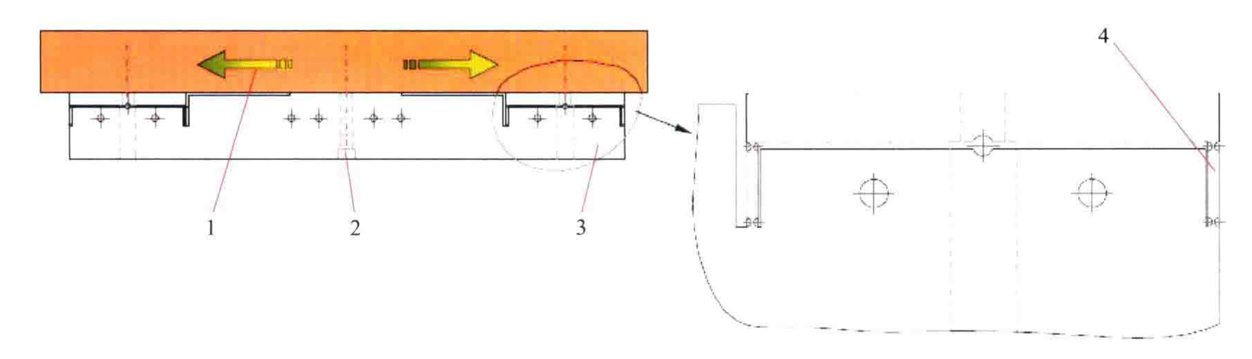


图 2－21　光栅安装设计原理

1—铸铁工作台的热膨胀；2—中心固定点；3—光栅安装铟钢座

4—铸铁工作台热膨胀补偿弹性铰链机构

铟钢座的两端是弹性铰链机构（4），弹性铰链的上端与铸铁工作台连接，光栅尺固定在下端。整个铟钢座以中心固定点（2）为中心并连同两端弹性铰链的上端用螺钉与铸铁工作台连接，当温度发生变化时铸铁工作台会产生热膨胀（图中箭头方向），膨胀是以中心固定点向左右两个方向进行，铟钢座虽然本身不会随温度膨胀，但其上端由于与工作台固定也会随之向左右移动。由于上下端之间通过弹性铰链连接，所以因温度引起的变形量完全由弹性铰链承担，固定光栅的下端并不会产生变形，利用上述机构就保证了光栅尺基准不会随着温度的变化而变化。

（5）直线电机断使能时导轨的锁紧保护装置

与伺服电机加滚珠丝杠驱动不同，直线电机在断使能状态下液压导轨工作台拖板的移动不会受到任何约束，所以超精密加工设备可能会发生碰撞，从而使刀具、工件甚至机床受到损坏。因此，在基于直线电机驱动的液体静压或气体静压导轨平台设计时需要增加一套锁紧保护装置，当直线电机处于断使能状态时该套装置能够限制工作台拖板自由移动从而起到保护作用，如图 2－22 所示。

图 2－22 中为一常伸出型单作用气缸（5）通过支架（1）与导轨底座固定，前端固定一斜块（3），推动上下两锁紧块（2）使之前端张开或闭合，两锁紧块中间夹持与移动工作台固定的锁紧条。在工作状态下气缸通气收回，此时两锁紧块在弹簧的作用下前端张开，锁紧条连同工作台可以随意移动，当驱动电机处于断使能状态或者发生其他特殊情况

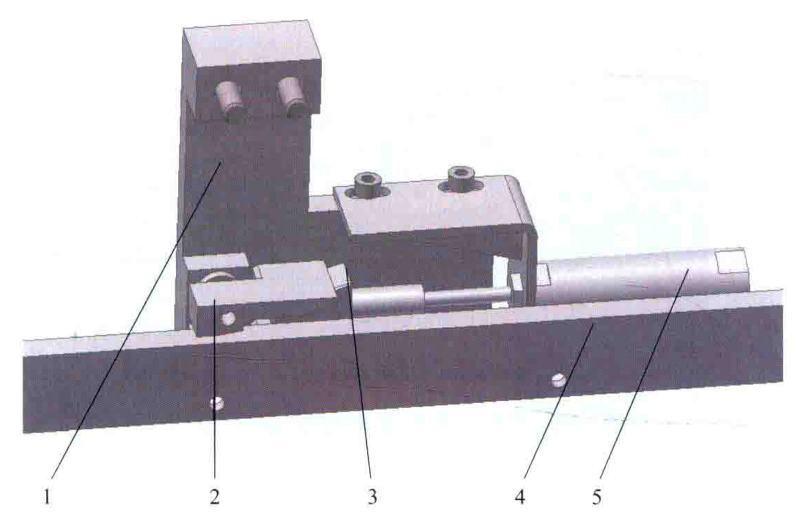


图 2-22　直线电机断使能时液压导轨的锁紧保护装置

1—支架；2—锁紧块；3—斜块；4—锁紧条；5—气缸

时气缸断气，在气缸弹簧的作用下斜块（3）推动锁紧块使其前端闭合夹持与工作台连接的锁紧条，从而限制了工作台的自由移动。

2.4.3　基于伺服控制的液压供油系统

超精密加工机床的液压导轨或液压主轴都需要恒温恒压的油源（液压泵站），目前使用的液压泵站都采用异步电机加定量泵并采用溢流阀调整输出压力，该系统的缺点包括能耗大、噪声高、溢流发热大、输出压力脉动大等。

针对传统液压供油系统的缺点，利用伺服电机响应快、精度高、恒转矩等优点，研制基于伺服控制的液压供油系统，即利用伺服电机驱动低噪声内啮合齿轮泵，通过对输出压力变化量的检测反馈控制调整伺服电机转速从而控制齿轮泵的输出流量，进而达到精确控制压力的目的，原理如图 2-23 所示，图 2-24 为伺服液压泵照片。

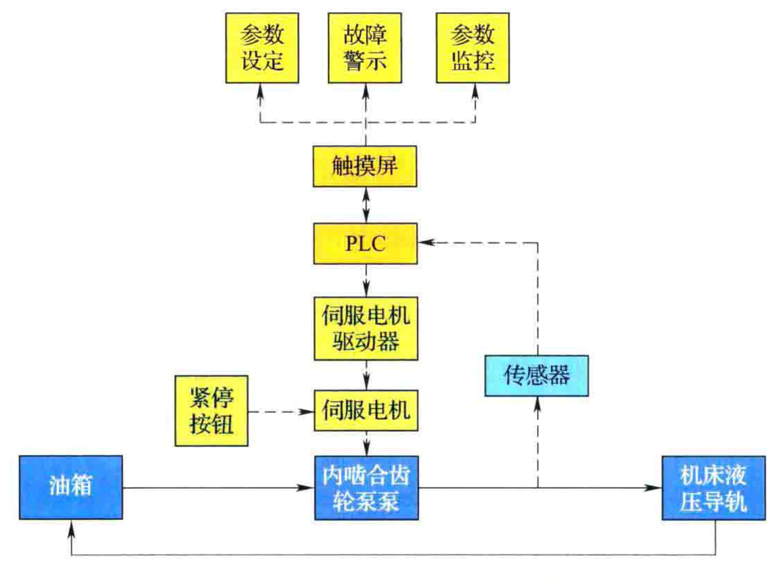


图 2-23　伺服控制液压站结构原理示意图

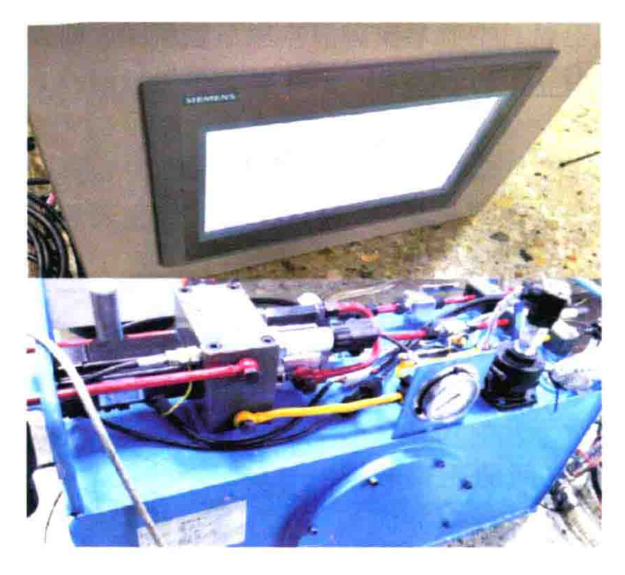


图 2－24　伺服控制液压泵

该供油系统可以在负载不断变化过程中提供稳定输出油压，采用以 PLC 为核心控制的闭环控制系统，利用压力传感器对泵输出压力进行实时监测并反馈给 PLC 控制器，通过 PLC 内部的 PID 算法，调整电机转速，达到精确控制压力的目的。从图 2－25 中可以看到，采用压力闭环反馈控制后，油压的波动为原来的 1/5。另外该供油系统还有良好的人机环境，可以利用触摸屏对供油系统输出压力或者电机转速进行设定，并且在触摸屏中可以对各个液压参数进行实时监控。利用该套系统为液压导轨供油，由于没有溢流损耗及发热，无需附加温控系统也可控制油温与环境温度保持一致，由于一般精密超精密机床对环境温度有一定的控制要求，所以该套系统不增加温控系统也完全可以满足精密超精密机床的使用要求。

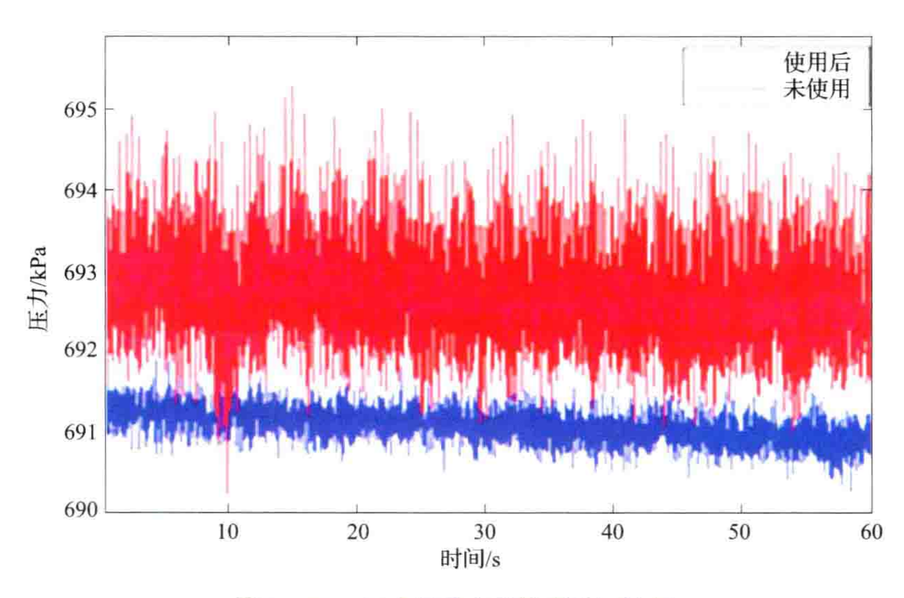


图 2－25　压力闭环实现精密油压控制

相比于传统的供油系统，该系统有如下优点：压力稳定精确、噪声低、具有自保护功能、人机界面友好、温升低、节能等特点，符合绿色环保的设计理念。

2.5 高同轴度孔加工气浮镗杆

2.5.1 研究背景

在一些框架类零件如三轴转台的中框、内框等，中长距离高同轴度（一般要求 2 ~ 5μm/800mm）孔系加工始终是此类零件加工的关键工序，传统的加工工艺如图 2 - 26 所示。对于几何尺寸较大的零件，由于其两孔之间的距离较长，超出了镗床镗杆（2）沿轴向方向的行程范围，若要在机床上完成两端孔的镗削，镗完前端孔（3）后，则需要将机床回转工作台（1）调转 180°后进行后端孔（4）的镗削加工。这种方法由于在加工两个孔时加工基准产生了变化，除机床本身的导轨直线度外，零件装夹时的误差，机床刀具主轴与工件转台的位置度误差，机床回转工作台的回转分度误差等均对最终的加工结果造成影响，因此要实现较高的同轴要求受到机床、工装、工艺等很多因素的制约。目前即使采用高精度的镗床加工也很难达到零件精度要求，所以要保证三轴台的精度只能在装配过程中边测量边调试，最终影响生产效率和设备的精度稳定性。

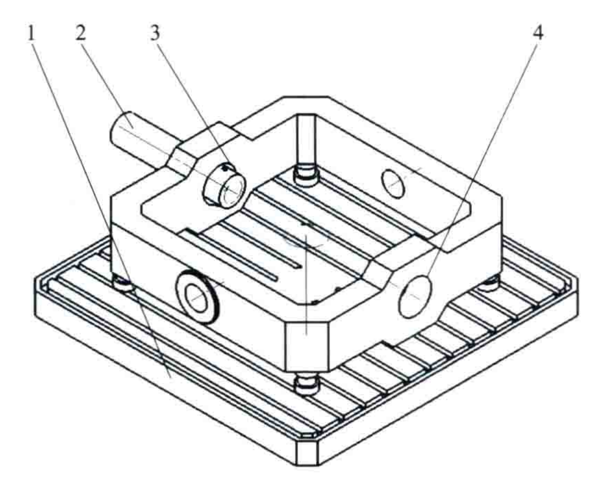


图 2 - 26 传统镗床加工框架类零件示意图

1—镗床工作台；2—镗杆；3—工件前端孔；4—工件后端孔

空气轴承或液压轴承的轴套零件对圆度、圆柱度及表面粗糙度要求较高（圆度要求 1 ~ 3μm，表面粗糙度 0.04 ~ 0.1μm），即使采用精密镗床加工有时也无法满足上述零件的图样要求，目前普遍采用的方法是通过研磨工艺达到零件设计要求。但是这种工艺对于一些特殊材料如空气轴承的铜轴套并不适合，不仅工件表面容易划伤，而且还需要一套复杂的研磨工装。

针对上述现有技术中存在的不足，可采用一种中长距离高同轴度孔的超精密加工装置，其目的是使孔系的加工精度不再依赖于机床导轨精度和机床回转工作台的定位精度，可以加工出同轴度指标优于机床导轨运动精度的孔系特征，极大地提高了中长距离孔系的同轴度指标。此方法改变了传统的调转机床工作台 180°方向分别加工的方法，消除了由于镗杆悬臂长度不同带来的误差，达到充分拓展机床的加工精度极限、提高加工效率、降低加工成本的目的。

2.5.2 高同轴度孔加工技术实施方案

该种中长距离高同轴度孔的超精密加工装置的主要特点如下：在镗床工作台（1）上安装两个支撑轴套（4），两个支撑轴套（4）的内孔之间穿过一根气浮镗杆（2），气浮镗杆（2）保证了两个支撑轴套（4）的内孔同轴，气浮镗杆（2）的外圆与两个

支撑轴套（4）的内孔表面之间通过压缩空气膜支撑（空气静压轴承）以实现高精度回转运动，机床工作台（1）通过镗杆支撑轴套（4）传递气浮镗杆（2）与工件之间的相对直线运动，气浮镗杆（2）在两个支撑轴套（4）外侧的延长段上分别装有用于镗孔的前刀具（8）和后刀具（9），气浮镗杆（2）上安装前刀具（8）一侧的延长段的顶端通过联轴器（7）和镗床主轴（6）连接，传递气浮镗杆（2）与工件之间的回转运动，如图2－27所示。

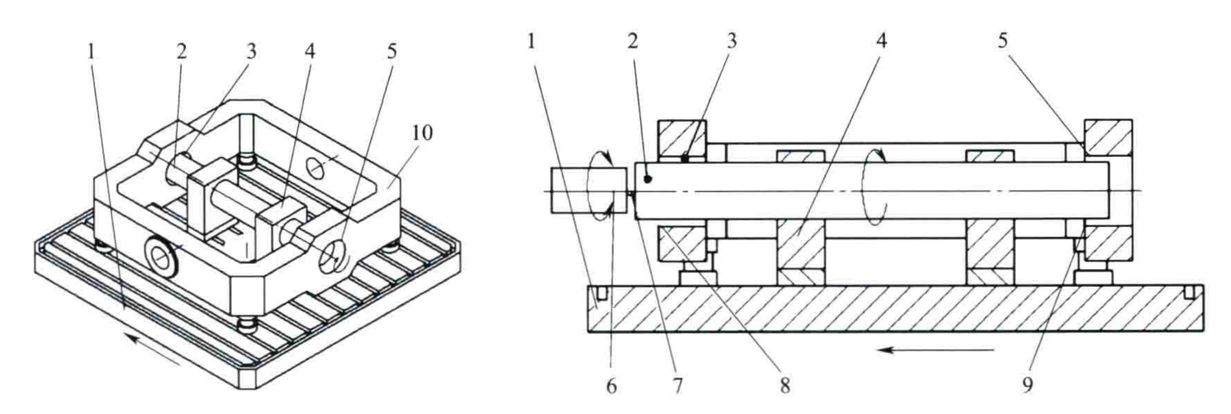


图2－27 气浮镗杆加工高同轴度框架类零件

1—镗床工作台；2—气浮镗杆；3—被镗削孔Ⅰ；4—支撑轴套；5—被镗削孔Ⅱ；6—镗床主轴；7—联轴器；8—镗刀Ⅰ；9—镗刀Ⅱ；10—被加工框架

使用该装置镗孔时，将气浮镗杆（2）的两个支撑轴套（4）置于被加工框架（10）内，支撑距离在满足加工行程的前提下尽可能大，保证整个气浮镗杆（2）的角向刚度；前刀具（8）和后刀具（9）分别在气浮镗杆（2）的直径方向可以进行微调，以保证镗孔的绝对尺寸；镗削前孔（3）和后孔（5）后，能够将气浮镗杆（2）退出孔口，以便进行孔径测量，确定孔径的余量和下次进刀的尺寸；气浮镗杆（2）的支撑轴套（4）下部加垫平行垫块，根据零件镗孔的中心高确定其厚度尺寸。机床主轴（6）与气浮镗杆（2）间以联轴器（7）传递轴向切削力并带动气浮镗杆（2）回转，这一轴向刚性、径向柔性的环节消除了机床主轴（6）回转误差带来的影响；采用此种方法镗孔时，不需要机床工作台进行180°回转，零件只需一次装夹，且加工基准不发生改变，前孔（3）和后孔（5）间的同轴度要求靠气浮镗杆（2）在支撑轴套（4）中沿轴向的运动精度来保证，消除了机床导轨直线性的影响。由于气浮镗杆（2）本身在支撑轴套（4）内运动精度较高，故较传统的加工方式可以大幅提高两孔的同轴度及圆柱度等精度指标。

本加工工装具有以下特点：

①该装置摆脱了加工设备精度条件的限制，可以进一步提高现有的加工精度，加工精度完全由工装保证，解决加工工艺中的瓶颈问题，从而提高所属产品的性能指标。

②使用该装置进行加工可以将以往大量用于手工修配、研磨和测量的时间大幅度压缩，以超精密加工工艺代替手工研磨，不仅提高了工件精度，而且也减轻了劳动强度、提高了效率。

图2－28气浮镗杆及精密内孔加工实例为在普通精密镗床上加工空气主轴内孔的实例，最终孔的圆度达到了0.3μm。



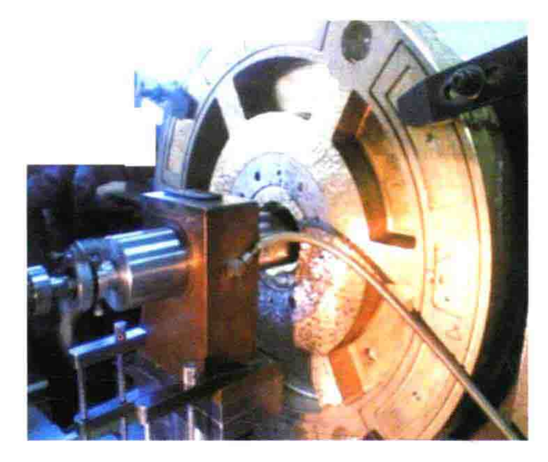


图 2－28　气浮镗杆及精密内孔加工实例

2.6　高位置度端面加工用气浮镗杆

在一些诸如三轴转台框架类零件的加工中，除了上面提到的要保证两孔的同轴度外，其他一些位置公差如两加工端面的平行度、端面与孔的垂直度等要求优于 5μm，如图 2－29 所示为传统的加工工艺示意图。主要加工工艺如下：利用千分表（4）找正被加工零件（2）一侧内孔后，将工件固定在转台（5）上，利用加工刀具（1），加工该侧的端面（3）；完成后转台（5）转动 180°，再利用千分表（4）找正该侧的另一个内孔，将零件（2）再次固定在转台（5）上，加工这一侧的端面（6），这种加工方法由于在加工两个端面时基准产生了变化，很难实现优于 5μm 的垂直度和平行度端面的加工需求。还有一种加工工艺是加工完一侧端面和孔后，将机床回转工作台调转 180°后进行另外一个端面及孔的加工，这种加工工艺除机床本身的导轨直线度外，零件装夹误差、机床回转工作台的回转误差等均会对最终的加工结果造成影响。综上所述，要在普通精密镗床上实现优于 5μm 的垂直度和平行度端面的加工将受到很多因素的制约，因此加工难度较大。

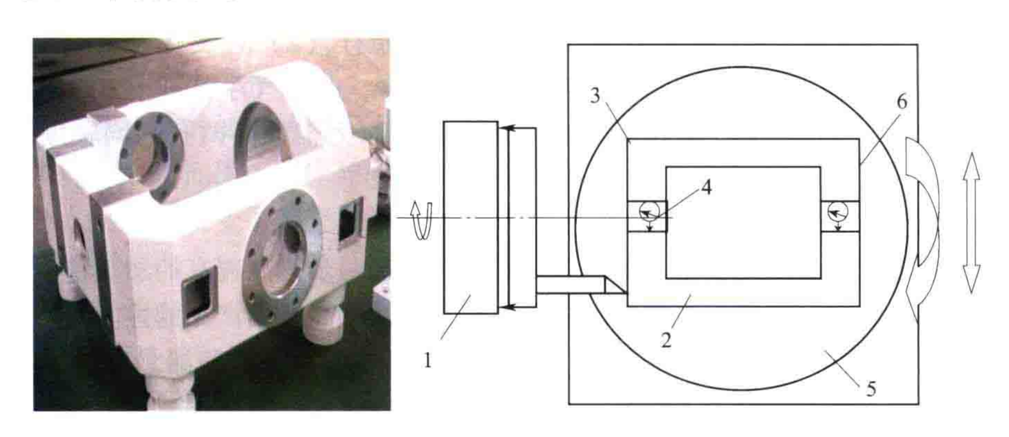
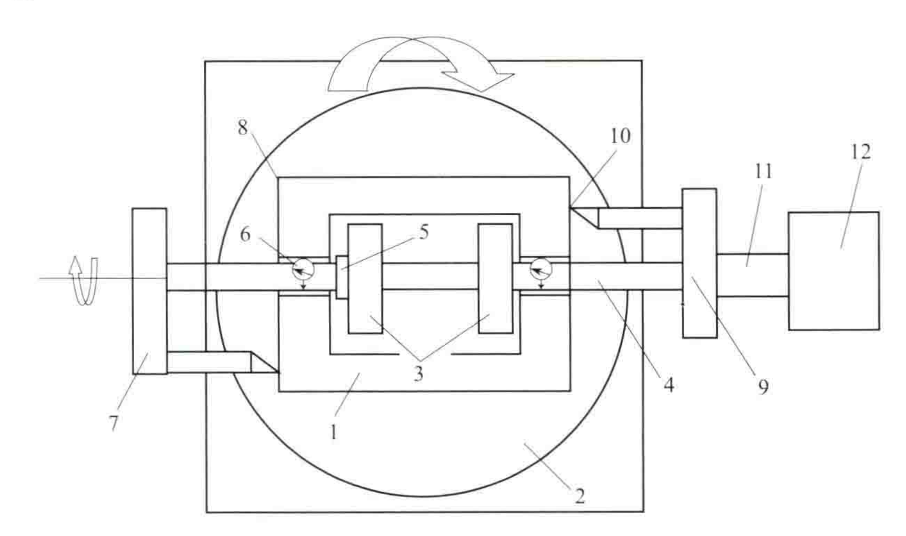


图 2－29　转台中框及其端面传统镗削工艺

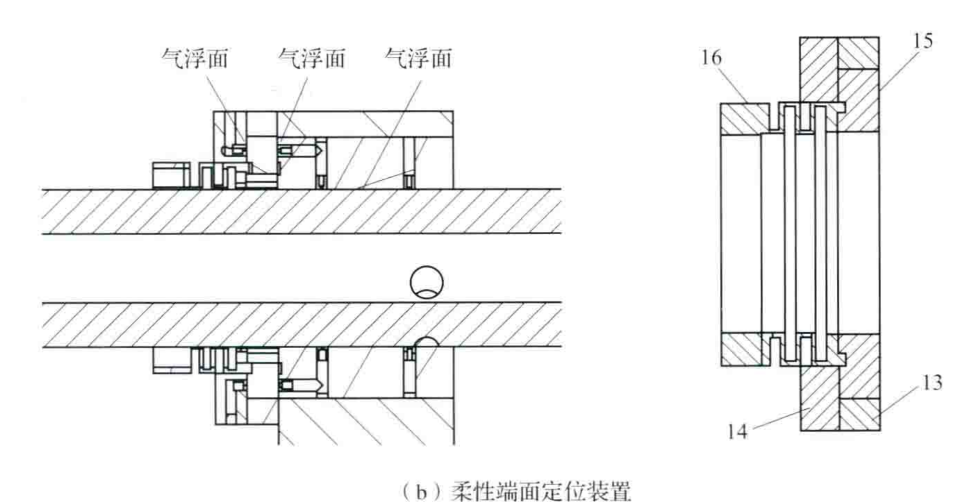
1—加工刀具；2—框架零件；3—加工端面；4—千分表；
5—镗床转台；6—加工端面

2.6.1　结构设计

2.5 节所介绍的气浮镗杆只能解决两侧高同轴度孔的超精密镗削，由于该工装无法进行轴向定位以及没有径向进刀装置，所以无法进行高精度端面的镗削加工。为此，可在上述工装的基础上加以改进，成为可进行高位置度端面加工的超精密气浮镗杆，该装置同时也具备高同轴度孔加工的功能，从而实现孔和端面一次加工。图 2－30（a）为其原理图。



（a）带端面加工功能的气浮镗杆工作原理图



（b）柔性端面定位装置

图 2－30　带端面加工功能的气浮镗杆工作原理图与柔性端面定位装置

1—被加工零件；2—工作台；3—支撑轴套；4—气浮镗杆；5—柔性轴向定位装置；6—千分表；7—刀具；8—端面；9—刀具；10—端面；11—联轴节；12—镗床主轴

13—固定隔环；14—气浮环；15—端面定位环；16—柔性轴向固定环

该种高位置度端面的超精密加工装置包括两个安装在加工工作台（2）上的支撑轴套（3），气浮镗杆（4）穿过两个支撑轴套（3）的内孔及零件（1）的待加工端面上的两个通孔，气浮镗杆（4）上套装一个安装在支撑轴套（3）上的柔性端面定位装置（5），加工刀具（7）分别固定在气浮镗杆（4）的两端，支撑轴套（3）通过气浮镗杆自定心保持

同轴，支撑轴套（3）与气浮镗杆（4）形成气体静压轴承，使气浮镗杆（4）能实现高精度回转运动。

本工装中最关键的部分是柔性轴向定位装置，其要求既能实现镗杆移动到任意位置时的轴向定位，同时又不会影响气浮镗杆的回转精度，原理如图 2－30（b）所示，其中包括柔性轴向固定环（16）、端面定位环（15）、气浮环（14）和固定隔环（13），其中柔性轴向固定环采用特殊结构设计，包括与镗杆的固定段及与端面定位环连接的柔性段。气浮环（14）、固定隔环（13）和支撑轴套（3）侧端面通过螺钉固定连接在一起，端面定位环（15）与柔性轴向固定环（16）的柔性段通过螺钉固定连接在一起，而柔性轴向固定环（16）的固定段可通过锁紧螺钉实现与气浮镗杆（4）在任意位置的抱紧固定。气浮环（14）、端面定位环（15）以及支撑轴套（3）通过小孔节流组成了端面气浮轴承，当柔性轴向固定环（16）与气浮镗杆（4）抱紧后，此端面轴承和两支撑轴套组成的径向轴承构成了一套完整的空气静压轴承，实现了完全径向和轴向约束，并可达到极高的运动精度。

当柔性轴向固定环（14）与气浮镗杆（4）抱紧时要求不能干扰端面气浮轴承的精度，所以其柔性段设计时沿轴线的截面呈波纹管状，并经过有限元分析仿真及结构的优化设计，使其轴向刚度和周向扭转刚度能满足加工要求，而其他方向的刚度远小于端面的气膜刚度，这样可以保证这套系统的端面精度。

2.6.2　内孔及端面加工工艺

由于两个支撑轴套（3）气浮镗杆（4）形成空气静压轴承，前后支撑套自动定心并保持同轴，利用 2.5.2 提到的加工工艺可进行内孔加工。加工完内孔后移动镗刀（7）到所需要的加工端面后，将柔性轴向定位装置与气浮镗杆（4）抱紧，形成轴向约束，即可以进行此端面镗削加工；完成后再加工另一个面时，松开柔性轴向定位装置，重新移动镗刀到新的加工端面位置，再次将柔性轴向定位装置于气浮镗杆抱紧，进行此面的加工。

由于此套装置的径向和轴向均采用了气体静压轴承，因此，利用该套工装可以实现两加工端面的平行度、端面与孔的垂直度以及两孔同轴度均优于 5μm 的加工精度。

2.6.2.1　万能镗头导轨间隙的影响及解决方案

利用上述工装可以提供端面镗削加工时高精度的基准，但同时还需要万能镗头实现径向自动走刀才能完成端面加工。现有的万能镗头均为滑动燕尾导轨结构，由于滑动导轨存在间隙，在镗削端面时移动时，随着上下导轨定位面长度（支撑跨距）的变化，造成角摆精度发生变化，如图 2－31 所示。这就使加工表面形成中凸或中凹的形状，影响端面与内孔的垂直度。

为降低滑动导轨的加工难度，同时保证导轨的运动精度和承载，目前都通过在两滑动副之间外加镶条，并通过加在镶条上的紧固螺钉调节导轨间隙。由于现有的镶条都是实心高刚度结构，导轨间隙无法完全消除，而且预紧力也不易控制。当预紧力过大时，导轨可能运动发涩甚至卡死，而当预紧力过小时，导轨间隙偏大影响运动精度。

利用一种能消除滑动导轨间隙的弹性镶条替代目前现有的镶条可以有效地改善上述情况，如图 2－32 所示。其目的是在不改变现有滑动导轨结构的前提下提高滑动导轨的运动

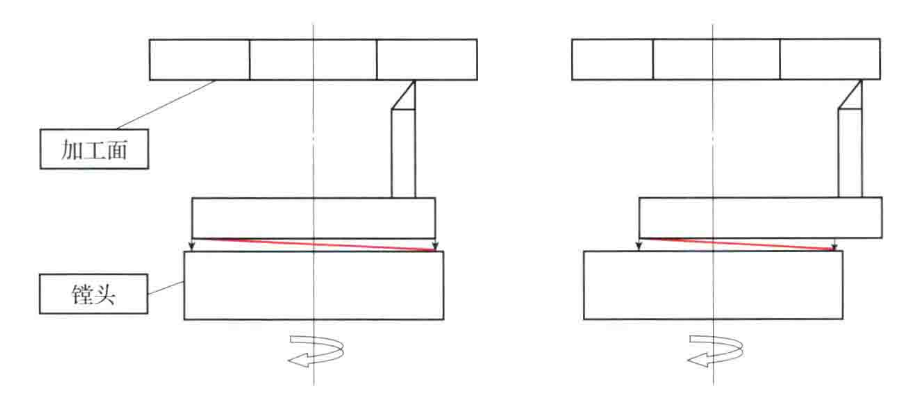


图 2－31　万能镗头燕尾导轨加工过程中角摆的变化

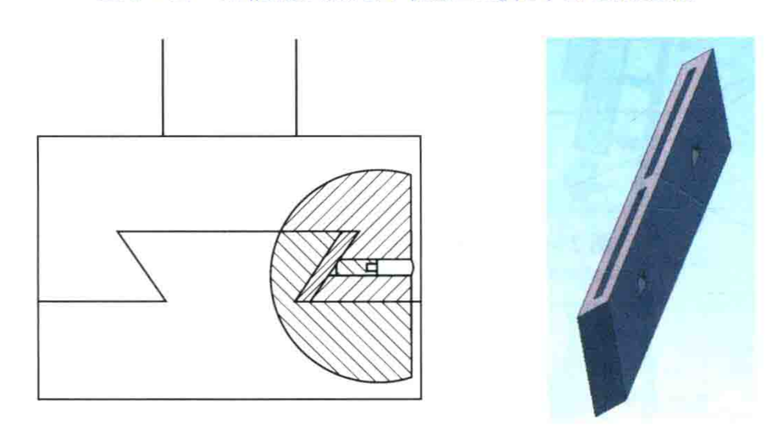


图 2－32　滑动导轨消隙弹性镶条

精度。此方法改变了传统的滑动导轨镶条预紧力施加不可控以及导轨间隙不能完全消除的缺陷，消除了由于导轨间隙的存在及预紧力的不匀对导轨运动性能的影响，达到充分发挥加工精度极限，提高设备性能的目的。

该镶条消除了现有滑动导轨存在的间隙，真正做到了零间隙运动，提高了滑动导轨的运动精度；同时保证了滑动导轨预紧力的恒定，提高了滑动导轨的动态特性。

2.6.2.2　镗杆的变形及解决方案

由于镗杆端部固定有万能镗头，重力将会使镗杆连同镗头发生变形从而影响端面的加工精度；同时由于万能镗头在使用中存在偏心质量，其产生的离心力对镗杆的变形也存在影响，如图 2－33 所示。特别是对于前后支撑都是采用空气静压轴承的气浮镗杆，刚度相对较弱，除了镗杆的变形外，还需要考虑气膜厚度的变化引起的镗头误差。

针对上述存在的问题，首先在精加工时在保证工件表面质量的前提下要尽量降低精镗削时的转速、减小悬臂距离等。同时针对镗杆重力变形可以考虑采用补偿措施使前支撑上抬、后支撑下压，最终保证端面的加工精度，如图 2－34 所示。

正常工作状态下，即使受到重力的影响，镗杆在前后支撑的气浮轴承内会处于一个稳定的位置。当调整前后支撑轴承上下部的供气压力时，镗杆的位置会产生微量位移，这就是镗杆变形补偿的基本原理。气浮轴承微量位移的原理详见 2.7。

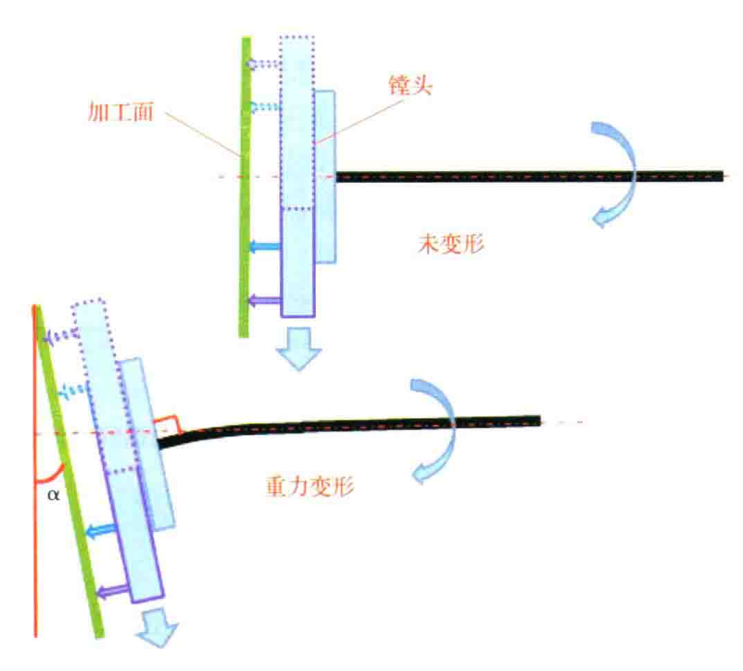


图 2－33 镗杆变形对加工精度的影响

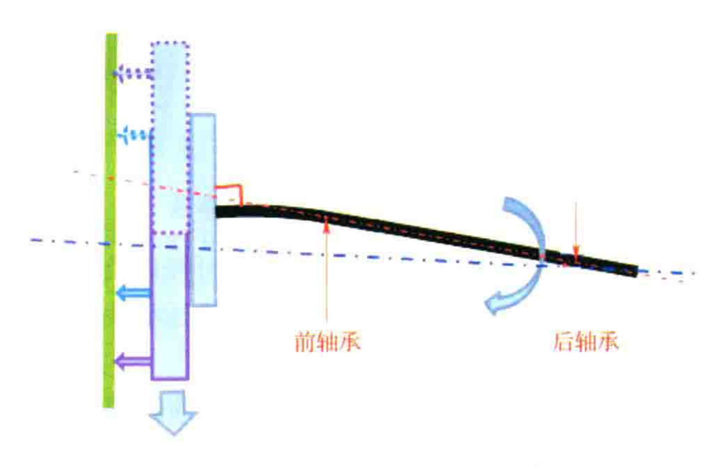


图 2－34 镗杆及镗头变形的补偿

2.7 基于空气静压轴承的微量进给系统

空气静压轴承和微量进给系统是超精密加工设备中最常用的基础元部件，本节介绍了一种基于空气静压轴承的微量进给装置，即利用改变空气静压轴承各气腔的压力使主轴或轴套偏置实现微量进给，这种装置将两种基础元部件的功能集于一体，简化了系统结构，可以应用在一些特殊场合，如前节所介绍的气浮镗杆变形补偿以及超精密镗床镗刀杆的微量进给等。

2.7.1 基本原理

用空气静压轴承实现微量进给的原理，是通过控制某一个或多个节流器的供气压力，来控制轴承内的压力分布，从而控制轴承的工作间隙，也就是实现了轴或轴套的微量

进给。

通常空气轴承供气压力的调节和稳定是通过调压阀实现的，这套微量进给装置的基本原理仍然是对调压阀进行控制调节，其控制原理如图 2－35 所示。普通空气轴承一般只有一个公共进气口，各个气腔的进气压力均相等，而此套微量进给装置的空气静压轴承各个气腔的压力可以分别单独控制。将其中相正对的两个腔（上腔、下腔）的进气压力通过比例阀或电致伸缩陶瓷控制器所控制的调压阀进行调节，而其余气腔的供气仍可由另一路气源供给。在调节电致伸缩陶瓷控制器的过程中，调压阀输出压力产生变化，使得空气轴承一个腔的供气压力产生变化，从而实现了其微量位移。

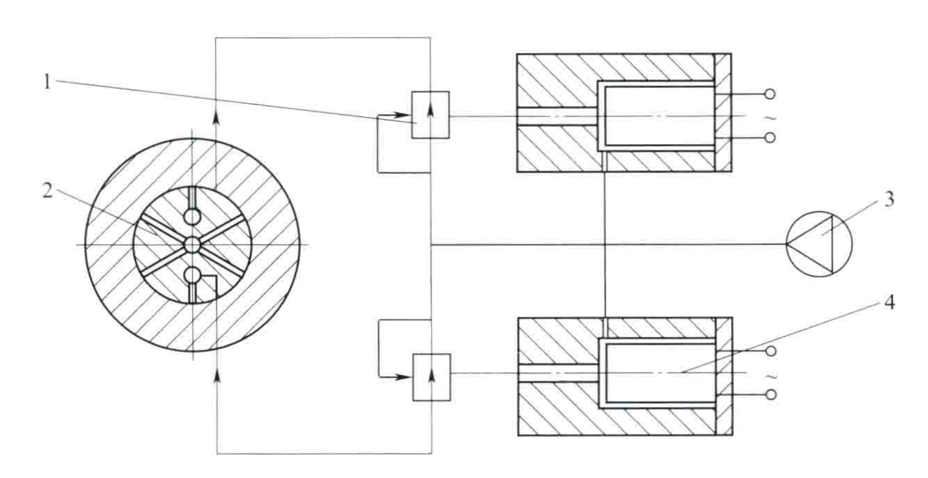


图 2－35　空气轴承微量进给装置原理图

1—减压阀；2—空气轴承；3—气源；4—电致伸缩陶瓷控制器

通常调压阀在调节输出压力时是依靠弹簧变形实现的，而电致伸缩陶瓷控制器的作用同样是利用调压阀调节输出压力，所以在设计时采用一个压力膜片代替弹簧作用从而实现压力调节。首先以直动式调压阀为例，分析其工作原理，如图 2－36 所示。

减压阀调节时其弹簧压力与输出压力关系为

$$P_2A_{膜片} = F_1 - F_2 = K_1s_1 - K_2s_2 \tag{2-1}$$

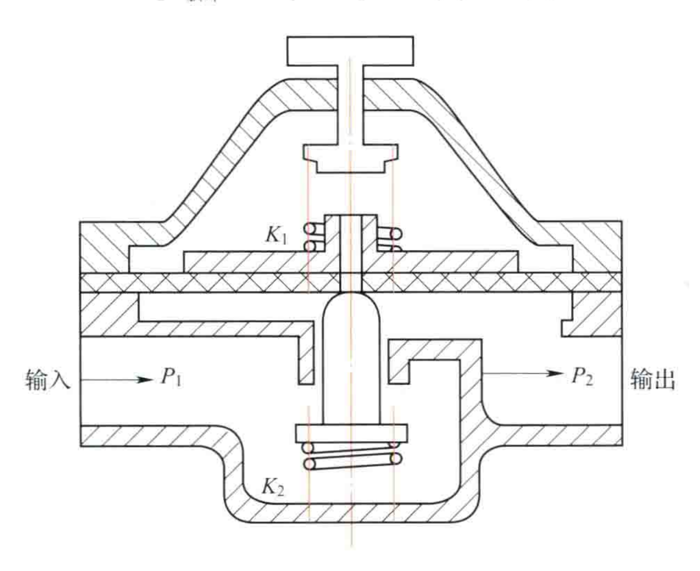


图 2－36　直动式调压阀原理

式中：P_2——输出压力；

$A_{膜片}$——膜片面积；

F_1，F_2——弹簧的压力；

K_1，K_2——弹簧的刚度系数；

s_1，s_2——弹簧的初始变形。

当弹簧压力变化时有

$$\Delta P_2 A_{膜片} = K_1 \Delta s_1 - K_2 \Delta s_2 \tag{2-2}$$

而 $\Delta s_1 = \Delta s_2 = \Delta h$（阀芯节流高度变化量），所以

$$\Delta P_2 = (K_1 - K_2)\Delta h / A_{膜片} = (\Delta F_1 - \Delta F_2)/A_{膜片} \tag{2-3}$$

由此可知，ΔP_2 与弹簧 1 的压力或变形量成正比。所以可以采用膜片产生的压力替代弹簧 1 而不改变其正比关系，这是电致伸缩陶瓷控制器的基本原理。电致伸缩陶瓷控制器结构原理如图 2－37 所示。

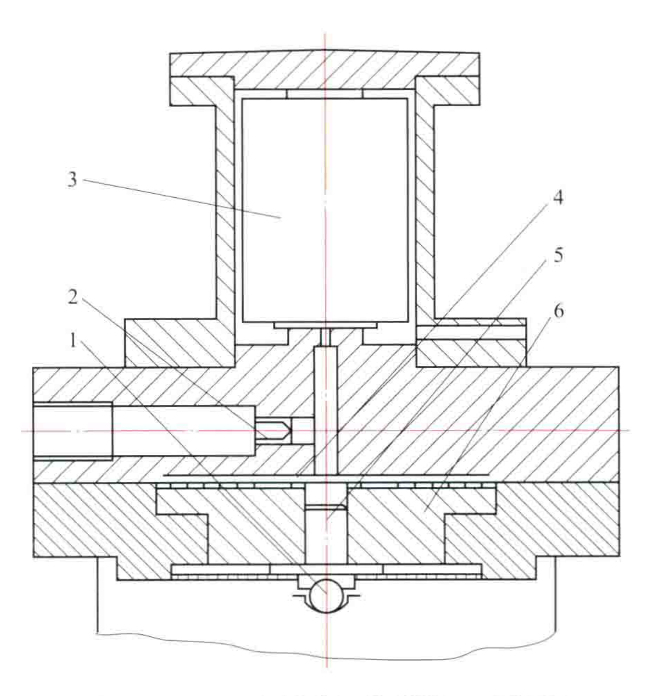


图 2－37　电致伸缩陶瓷控制器结构原理图

1—溢流钢球；2—节流孔；3—电致伸缩元件；4—橡皮膜片；5—销；6—压套

电致伸缩陶瓷控制器的供气压力 P_0 经过小孔（2）节流后产生输出压力 P_d，P_d 又通过电致伸缩陶瓷（3）的端面节流后排入大气。这里压力 P_d 直接作用于下部的膜片（4），推动压套（6）和顶销（5）。顶销作用于调压阀的溢流钢球上，使调压阀工作。因此，膜片、压套和顶销即代替了原来减压阀中的弹簧（1）。

在供气压力 P_0 调定后，P_d 的大小只受电致伸缩陶瓷的端面节流作用影响。当控制电压增大，电致伸缩陶瓷产生位移，使节流面积减小，P_d 值增大，推动膜片向下移动，减压阀输出压力增大。反之，当电致伸缩陶瓷控制电压减小时，减压阀输出压力也随之减小。这样就实现了用电压信号对气体压力的精确调节。

之所以采用电致伸缩陶瓷控制膜片压力 P_d 排入大气的出口压力降而不采用其端面节流替代节流小孔（1）调节供气压力 P_0 产生的输出压力直接控制膜片，主要有以下原因：

端面节流与小孔节流组成了桥式回路，提高了气体压力调节的灵敏度；减小了气压调节气腔的体积，提高了系统的响应频率。

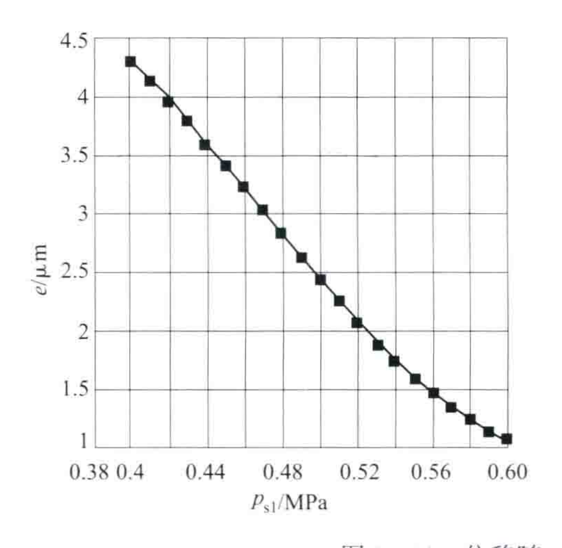
2.7.2 空气静压轴承微量进给系统应用实例

2.7.2.1 微量进给量的理论计算

由于空气静压轴承的供气压力和位移的关系很复杂，不能直接用一个表达式来表示，只能采用数值计算手段根据平衡条件式用迭代法求出轴承作缓慢运动时轴心的各个位置。通过控制空气轴承上腔供气压力 p_{s1}，空气轴承下腔供气压力 p_{s4}，来控制轴承内的压力分布，从而改变轴承的承载能力，轴心便在力的作用下运动，当轴承的承载能力达到与外载荷大小相等时，轴心便停止运动，此时，轴承处于新的平衡位置。具体有限元分析过程不再赘述。

利用上面介绍的方法对空气静压主轴微量进给系统进行计算，空气静压径向轴承的参数如下：轴承直径 $D = 120$mm，轴承长度 $L = 120$mm，双排节流孔，每排节流孔数 6 个，轴承的单边间隙 $h = 10\mu$m，主轴系统由两个空气静压径向轴承和止推轴承支承，轴承上的所有载荷重量为 900N。

改变上腔供气压力 p_{s1} 和下腔供气压力 p_{s4} 时，计算出的供气压力和位移关系曲线如图 2－38 所示，同时改变 p_{s1}、p_{s4} 供气压力时，计算出的供气压力和位移关系曲线如图 2－39 所示。



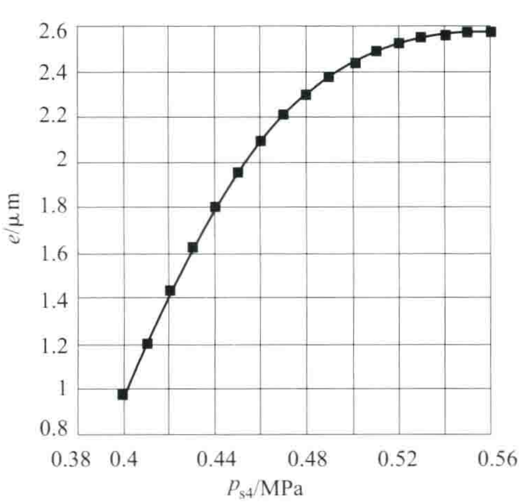


图 2－38 位移随 p_{s1} 及 p_{s4} 的变化规律

从图中的变化趋势看出，位移连续变化，理论位移精度为无穷高。下面分三种情况分别讨论：①当控制 p_{s1} 供气压力时，从 0.4MPa 变化到 0.6MPa 时，轴承所能产生的最大位移为 1.8μm；②当控制 p_{s4} 供气压力时，从 0.4MPa 变化到 0.6MPa 时，轴承所能产生的最大位移为 3.2μm。③当同时控制 p_{s1}、p_{s4} 供气压力时，p_{s1} 从 0.4MPa 变化到 0.6MPa，同时 p_{s4} 从 0.6MPa 变化到 0.4MPa 时，轴承所能产生的最大位移为 4.2μm。

2.7.2.2 超精密平面磨床微量进给系统

图 2－40 为超精密平面磨床的典型结构示意图，总体采用龙门式结构，砂轮主轴采用了中置式空气静压轴承，Z 轴进给采用了滚珠丝杠驱动，并采用重量平衡系统以及卸荷装

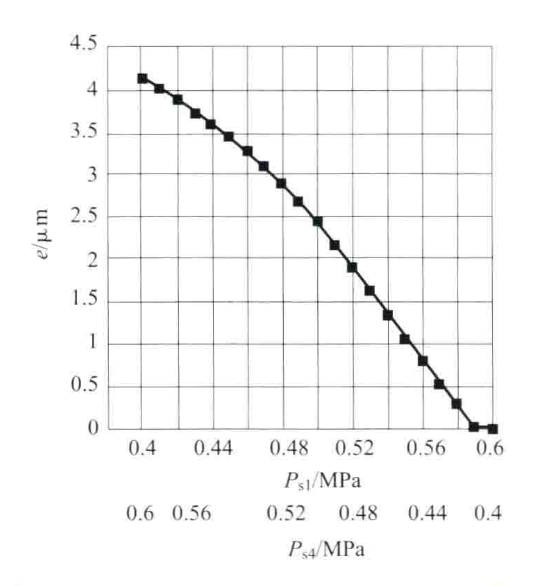


图 2-39 同时改变 p_{s1}、p_{s4}时位移的变化规律

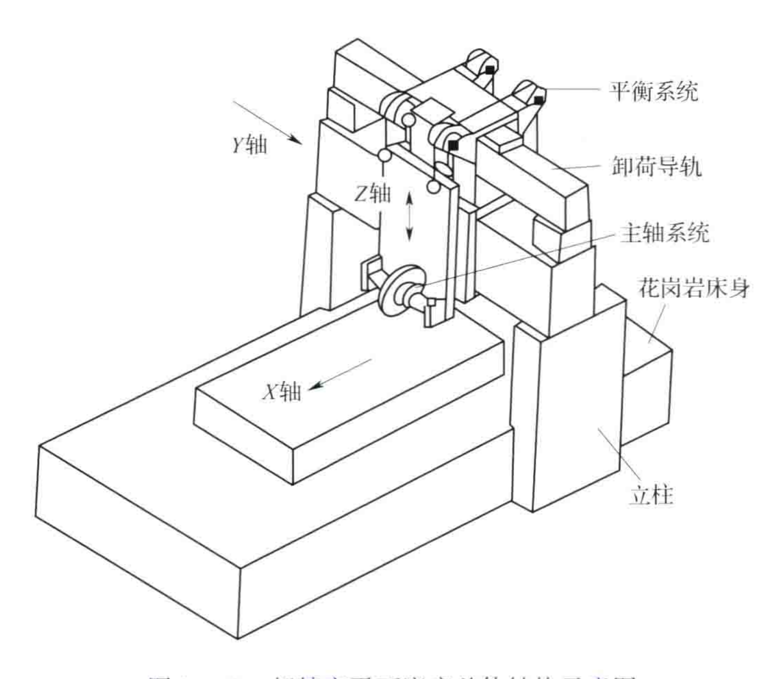


图 2-40 超精密平面磨床总体结构示意图

置保证了设备精度，同时该设备还具有平面度误差补偿功能。由于龙门式超精密平面磨床 *Z* 轴进给导轨连同磨头具有很大的质量，为了避免由于大质量运动部件所产生的惯性对微量进给精度、灵敏度的影响，特别提高误差补偿加工时的系统的动态响应频率，设计时考虑采用了上述基于空气轴承的微量进给系统。

如图 2-41 所示为微量进给装置控制与测试系统结构框图。这里位移传感器是在进行系统静动态特性测试、模型参数辨识及离线学习跟踪砂轮刀具轨迹时使用（此时砂轮不作旋转运动），而在实际补偿及加工过程中，该传感器不参与系统工作。这是因为加工时，砂轮作旋转运动以及其他各种干扰因素的影响，对砂轮位移量直接精确测量非常困

难，传感器的长期稳定性和精度也不易保证。因此在补偿加工控制时，采用易于安装且精度与稳定性好的气体压力传感器检测气体轴承进气调节压力变化进行半闭环控制，这样一方面可以避免压电晶体磁滞效应的影响，另一方面采用合适控制策略通过半闭环控制可以提高系统响应速度。

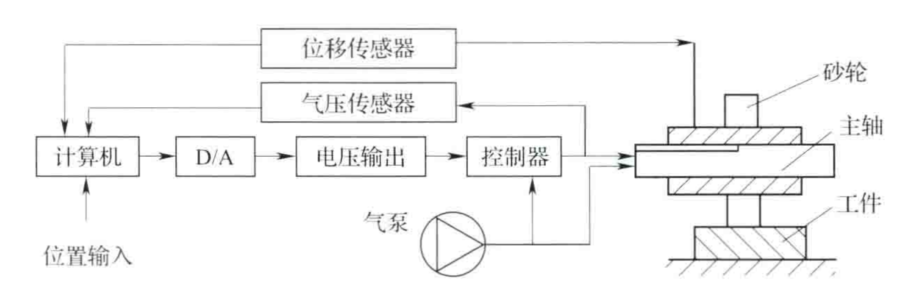


图2-41 超精密磨床微量进给系统

2.8 带有微调机构的超精密分度转台

2.8.1 精密分度转台的典型结构

精密分度转台在检测及精密加工设备等方面有着广泛的应用，例如精密镗床工作台的分度精度直接影响到被加工工件的精度。以三轴转台典型框架类零件为例，其中关键的尺寸为圆周分布的四个精密孔系的空间位置度及尺寸精度，随着三轴转台性能指标的提高，框架类零件的精密孔及孔系的加工精度要求越来越高，例如框架尺寸在500mm范围内，对应孔的同轴度要求优于2μm，这就要求精密镗床工作台的分度精度要小于1″，目前现有的精密数控镗床已经无法满足精度指标要求。现有的精密转台工作时都是采用旋转到位后再锁紧（一般高精度转台是液压锁紧）的方式，即使实现了精确转位，锁紧时经常出现角度偏移，无法满足1″的分度精度。

目前精密数控机床用的回转工作台主要有以下几种结构形式：蜗轮蜗杆驱动数控回转工作台、力矩电机直接驱动工作台、端齿盘数控回转台等。

其中由伺服电机直接通过蜗轮蜗杆驱动的回转台，是利用蜗轮蜗杆的自锁原理，加装圆光栅作为回转轴的反馈形成闭环，实现任意位置精确定位，并能与数控机床的X、Y、Z三个直线坐标轴实现联动，但这种结构的回转工作台的驱动蜗杆及蜗轮必须有较高的精度及耐磨性（一般采用硬质合金蜗杆及铝化钢蜗轮），因此价格较高。

另一类回转台是较经济的在圆周内可以实现每整度数定位的端齿盘数控回转台，这种回转台一般采用齿形带或齿轮齿圈传动，转台分度用高精度端齿盘定位并夹紧，定位精度可以达到1″~2″。在坐标镗床等不需要回转台与其他轴实现联动时，此类型数控回转台既经济又耐用。端齿盘的制作在国内已经有相对成熟的经验，制造高精度端齿盘并不很困难，成本相对较低。

力矩电机直驱式数控转台是通过力矩电机直接驱动工作台旋转，并通过编码器对电机的转角进行位置反馈控制，这种直驱式数控转台由于省却了传动机构，工艺性上更容易实现，同时也避免了传动副所带来的磨损，其特点是定位精度高（2″~3″）、转速快，目前

这类转台已被广泛应用于一些高精度、高效数控加工中心。

2.8.1.1 精密转台的定位夹紧技术

精密数控转台具备固定角度的分度定位或任意角度的定位夹紧功能。这是因为在对工件指定角度平面或定向特征进行定位加工时，仅靠驱动系统和传动机构通常并不能满足工件所需的定位精度要求。即使定位精度能够得到保证，当刀具或工件承受较大切削力时，尤其是在重切削时，其所处的回转轴也将承受较大的切削扭矩，这势必会带来驱动电动机发热量大、传动机构受力变形和传动刚度不足而引起刀具或工件振动等问题，从而严重影响工件的加工精度。因此，回转轴中定位夹紧机构的应用，不但能够为回转轴指定角度加工提供较高的定位精度，还能够分散传动机构定位加工时的受力，将力直接传递给箱体，使驱动系统和传动机构得到释放，从而保证回转轴具有较高的传动刚性。

（1）固定角度的定位夹紧机构

端齿盘式定位夹紧机构具有固定角度分度定位功能，通过动齿盘与静齿盘的脱开、转位和啮合即可实现回转轴的锁紧和高精度的分度定位。其最小分度单位受齿盘的齿数限制，由于误差平均效应，齿盘的齿数越多，定位精度也越高，常用的端齿盘定位精度一般可达 ±2″以上。因此，此类机构常用于有固定角度分度功能的数控转台、数控刀架和角度头等功能部件的设计中，通过齿盘的分度定位功能在某一固定角度来锁紧回转轴，实现工件某一固定角度的定位加工。端齿盘还具有传动扭矩大、传动刚性好等特点，设计中为了保证分度定位能够提供足够的扭矩和较高的保持刚性，通常通过液压拉钉或碟簧等机构在轴向方向上对端齿盘施加一定的轴向预紧力来锁紧动静齿盘，详见本章 2.9 节。

（2）任意角度的定位夹紧机构

应用齿盘式定位夹紧机构只能实现指定角度和倾斜度的孔或表面的定位加工，从加工范围上来讲，这限制了数控机床的加工能力。因此，任意角度定位夹紧机构是为了实现工件任意角度加工特征的定位加工而设计的。由于夹紧机构本身并不具有分度功能，回转轴的任意角度的定位夹紧功能首先需要靠回转轴的驱动系统、传动系统和角度编码器组成的闭环结构来实现角度分度定位，分度精度由角度编码器决定，再通过夹紧机构对回转轴定位锁紧完成。目前，常见的任意角度定位夹紧机构主要有碟片式定位夹紧机构和环抱式定位夹紧机构两种。

①碟片式定位夹紧机构

碟片式定位夹紧机构的结构形式很多，图 2－42 为其中一种典型的结构。其主要原理是通过活塞对安装于回转轴旋转单元的弹簧碟片施加一定的轴向力，使弹簧碟片与固定环型面的端面贴合产生摩擦力，从而达到回转轴定位夹紧的目的。碟片式定位夹紧机构可以通过增加活塞内介质的压力以及弹簧碟片的作用面积，来提高机构的夹紧扭矩。但受空间结构的限制，碟片的作用面积一般较小，因此，夹紧扭矩受到了限制，目前只在回转扭矩小的转台和铣头上得到了应用。

为了增大碟片式夹紧机构的夹紧扭矩，部分厂商尝试了一种多碟片式夹紧机构，成倍地增加了摩擦接触面积，从而增大了碟片夹紧的扭矩，较单片碟片式夹紧机构可以达到两倍以上的夹紧扭矩，取得了很好的效果。碟片式定位夹紧机构在设计时除了考虑到扭矩因素之外，还要考虑夹紧机构在回转单元中的布置位置，在空间允许的条件下，尽量增大刹车片的作用面积，且靠近工件的受力面，以提高定位加工时结构的传动刚性。

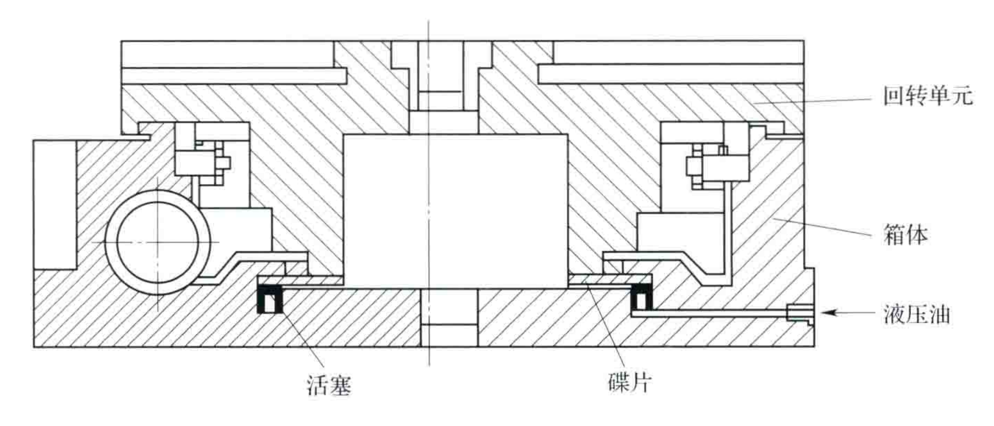


图2-42 碟片式定位夹紧机构

碟片式定位夹紧机构的夹紧动作可以通过液压和气压两种方式实现。由于液压夹紧方式很容易获得较高的压力，因此可以获得更大的夹紧扭矩。但相对于液压夹紧方式来讲，气压夹紧方式则具有清洁、可靠性高和夹紧速度快等优点。

②环抱式定位夹紧机构

环抱式定位夹紧是通过夹紧套或环形刹车片在径向方向上作用于旋转轴的圆周表面，从而产生摩擦扭矩对回转轴进行角度定位的夹紧方式。目前常见的环抱式定位夹紧机构主要有液压夹紧套和气压抱闸两种。

液压夹紧套的工作原理是将油压至抱闸套筒壁的密封之间毫无损失地转换成径向夹紧力，并使套筒内壁作用于回转轴的外圆周表面，从而产生摩擦扭矩的夹紧方式，如图2-43所示。

被夹紧的元件在夹紧定位发生时，既不会产生向推动，也不会产生扭曲，当油压完全卸荷，套筒弹回最初状态，再次释放部件。此类夹紧机构的特点是结构紧凑，夹紧扭矩大。

气动抱闸虽然在大夹紧扭矩的获得上效果不如液压夹紧套，但其具有反应速度快、安装简单和清洁度高的优点，尤其值得一提的是，此类气动抱闸本身还具有安全夹紧的功能，当系统掉电时，气源消失，弹簧会恢复形变，抱闸自动夹紧回转轴，能够有效防止系统失去动力后回转轴由于自身重力或磁力作用产生难以预料的动作造成刀具或工件的损坏。

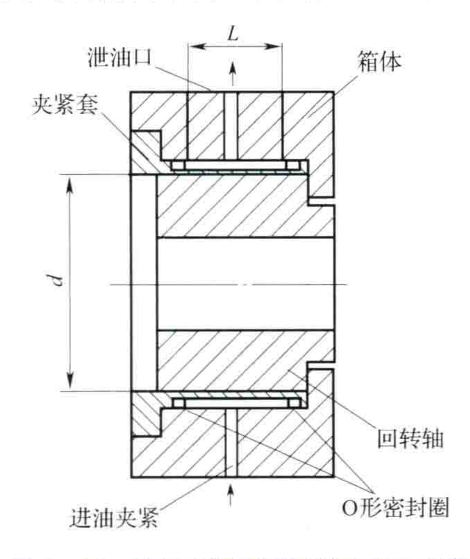


图2-43 液压夹紧套对转轴的定位夹紧

2.8.1.2 超精密转台的总体设计

前面介绍了精密转台所用的几种夹紧方式，但是无论采用哪种夹紧方式，都会对转台的精度产生不利的影响。当回转工作台的定位精度要求小于1″，上述介绍的几种结构形式的工作台都无法满足使用要求。下面介绍一种特殊结构的超精密回转工作台，最终可实现定位精度小于1″。

该超精密分度转台采用双轴系结构设计，即由一对角接触轴承和端面密珠球轴承组成的可连

续回转轴系 1（如图 2-44 所示），以及由径向密珠轴承和端面滚针轴承组成的调整轴系 2（如图 2-45 所示），两套轴系采用同一套高精度位置检测元件——圆光栅进行角位移的检测与反馈。

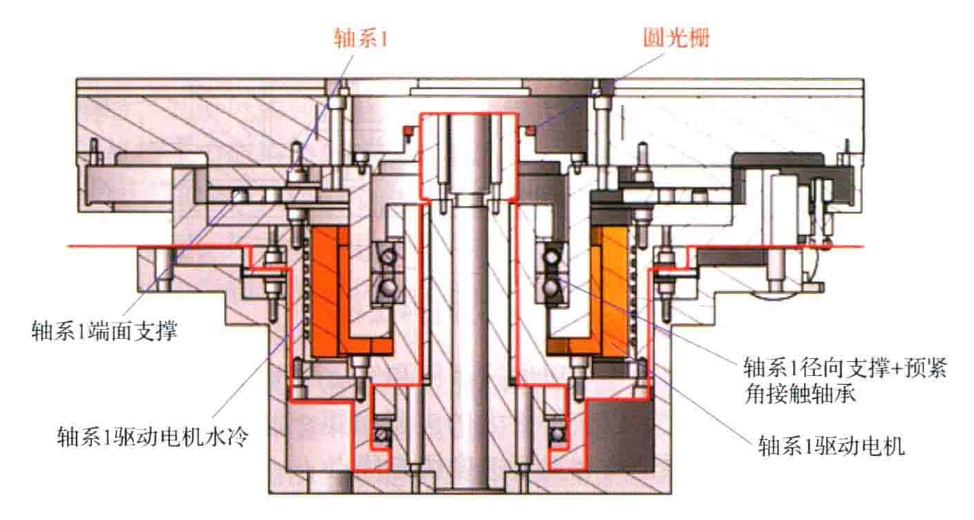


图 2-44　双轴系超精密分度工作台的连续回转轴系

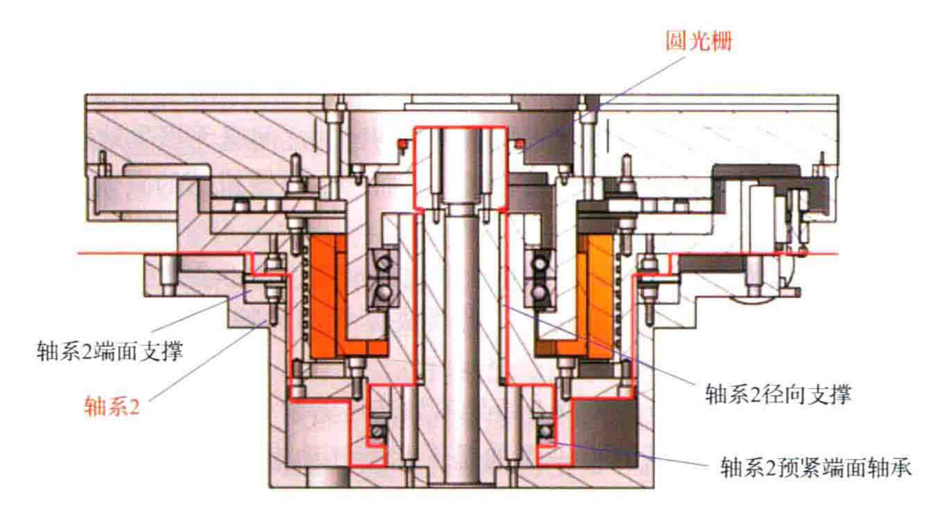


图 2-45　双轴系超精密分度工作台的调整轴系

连续回转轴系 1 采用大直径的端面密珠轴承设计，保证了轴系的端面跳动及角摆等精度，径向跳动精度由一对精密角接触轴承保证。分度转位时首先连续回转轴系转动到位并锁紧保证精度小于 10″，然后通过精密微调机构驱动调整轴系保证最终的分度精度，由于调整轴系特殊设计不需要锁紧，所以整套系统可以实现小于 1″精度的定位。由于微调机构的调节范围仅为正负 10″，所以调整轴系在如此小的范围内运动，其运动精度基本不会影响回转台的定位精度。

连续回转轴系及可调整轴系的设计与普通精密转台轴系设计相同，在此不再详述。下节主要描述调整轴系的精密微调机构的设计及计算。

2.8.2　微调机构的设计与计算

为了可以实现分辨率为角秒级以下的精密调整，超精密转台及其调整机构的设计难点

在于实现分辨率0.2″精确调整的同时，不需要再次锁紧就可以实现精确定位，并且要具有足够的刚度，能够在加工力等外载荷的干扰下维持0.2″调整精度，由于设计的调整机构涉及滚动与滑动等多个环节，其驱动刚度无法进行精确的计算，而且调整机构驱动刚度的大小直接影响转台的保持精度，因此需进行调整机构驱动刚度计算、仿真，并对其结构及尺寸进行优化设计。

精密微调机构由调整部分与执行部分两部分组成，调整部分的原理是一套减速机构，本例中是由一套蜗轮蜗杆减速器组成，执行部分为梯形螺纹传动，如图 2－46 所示。螺纹传动采用螺母固定、螺杆旋转方式实现，利用簧片式联轴节来吸收螺杆产生的相对于蜗轮蜗杆减速器输出轴的轴向位移量；为防止螺杆旋转时的干扰力影响转台精度，螺杆头部采用球面结构顶紧支撑块，支撑块与转台旋转轴系连接块之间安装密珠球轴承减小摩擦，并利用碟型弹簧施加预紧力，调整完成后无须进行锁紧，这样就避免了普通转台锁紧干扰精度的问题。

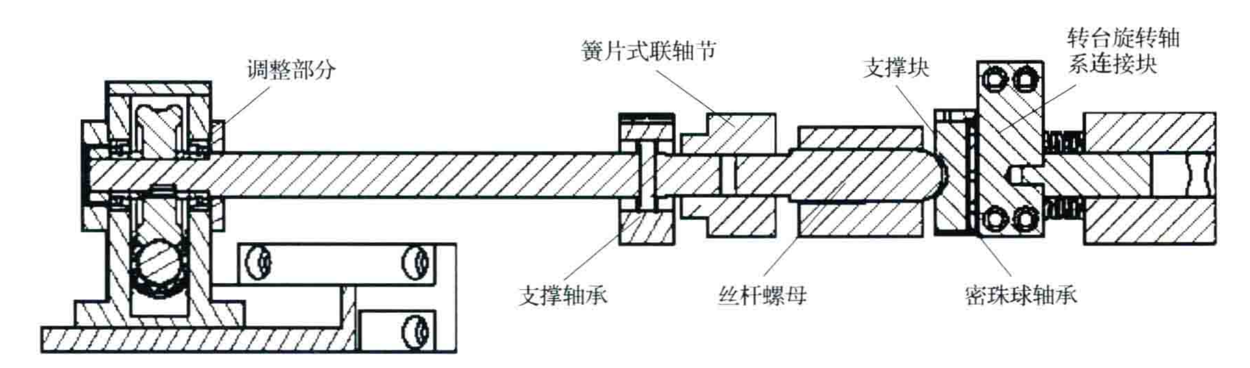


图 2－46　精密微调机构结构图

上述精密调整机构可简化为如图 2－47 所示的模型。以转台旋转轴系连接块为研究对象，可得力平衡公式

$$k_1(x_{10}-x_1)=k_2(x_{20}-x_2) \tag{2-4}$$

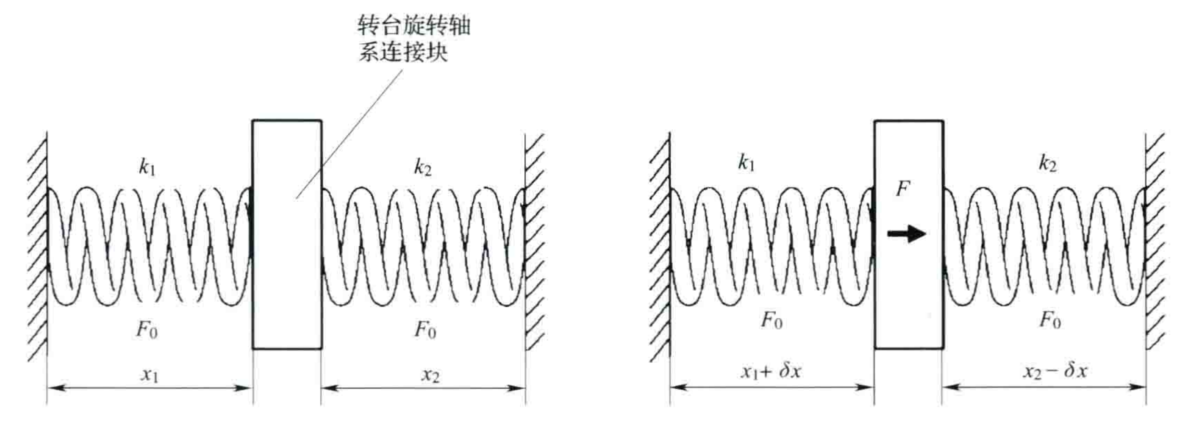


图 2－47　精密微调机构数学模型

转台受到一个外加载荷力 F 时，同样以转台旋转轴系联接块为研究对象，可有力平衡公式

$$F+k_1(x_{10}-x_1-\delta_x)=k_2(x_{20}-x_2+\delta_x) \tag{2-5}$$

其中：k_1—左侧调整系统综合支撑刚度，N/mm；

k_2—碟簧刚度，N/mm；

x_{10}—弹簧 1 初使长度，mm；

x_{20}—弹簧 2 初使长度，mm；

x_1—预压后弹簧 1 长度，mm；

x_2—预压后弹簧 2 长度，mm；

δ_x—加外载荷后弹簧 1 或 2 长度变化量，mm。

由式（2－4）和式（2－5）联立可得到方程式

$$F=(k_1+k_2)\delta x$$

$$k=k_1+k_2 \tag{2-6}$$

由式（2－6）可得出此调整机构的刚度为连接块两端的支撑刚度之和，由于预紧碟簧刚度相对较小，因此，要提高调整机构的刚度就要尽量提高传螺杆端的接触刚度。

预紧碟簧在精密调整机构中有两个重要功能，一是使转台在调整机构的作用下直接具有抵抗外载荷的能力，二是通过预加载荷提高了调整机构的接触刚度，尤其是增大了密珠端面轴承的刚度。

2.9 端齿分度台

端齿分度台或精密端齿盘又称多齿盘、细齿盘、鼠牙盘，是具有自动定心功能的精密分度定位元件，广泛应用于加工中心、柔性单元、数控机床的分度以及加速度计标定等测试的角度基准，如数控车床中的多工位自动回转刀架、铣床及加工中心用的回转工作台及其他分度装置中大都采用端齿盘作为精确定位元件。

2.9.1 概述

2.9.1.1 端齿盘的特点

端齿盘由于是多齿连续啮合，因而具有分度精度高、自动定心等特点。在不断的使用过程中由于上齿盘和下齿盘不断脱开、位移、啮合，而形成一个自然的对研过程，这样就可以不断改进啮合质量，并逐渐减少残余的分度误差。因此端齿盘的使用过程在一定范围内其分度精度是一个不断提高的过程。

①分度精度高：端齿盘分度装置上齿盘和下齿盘啮合时，由于全部齿牙同时参与啮合定位，多齿啮合的“平均效应”和“弹性过约束原理”使端齿盘的啮合分度精度大大地高于齿盘的加工分度精度。啮合时，齿侧几乎是无间隙，使其对分度精度影响极小，并可长期保持。目前国内较成熟的工艺水准，分度精度可达到 ±0.1″（一般称峰值 0.2″），重复定位精度可达到 0.02″。

②自动定心性好：在分度定位过程中环状均布的端面齿啮合时均应有一个确定的啮合圆。理论上说这个啮合圆的中心位置不变，即上齿盘的中心位置不变，这就是自动定心原理，即不借助轴系，端齿盘成为一个没有间隙而刚度很大的轴承。一般认为精度为 0.2″量级的分度台其回转精度不超过 0.2μm（垂直方向角偏摆小于 0.1″）。

③定位刚性好，承载能力大：两齿盘啮合定位时，接触面大犹如一个整体。在径向、

轴向、切向力作用下，使其定位刚性更好，并能承受较大的负载，完全可承受精密加工时的切削力。

④端齿盘分度装置还具有结构简单、紧凑、体积小、工艺性好、易实现自动分度等优点。

⑤工作环境对它的影响较小。

⑥由于不能进行任意连续分度，分度时至少要转过一个齿，所以一般只能将圆周分成有限的等分度。这使这种装置的分度受到一定限制。

2.9.1.2　端齿盘的应用

目前端齿盘的开发应用大致可归为以下三大类：直接作为检测精密测角器件和圆分度标准器；直接作为加工和定位用的分度装置；作为各种（手动、半自动、全自动）测试和加工设备的分度器件。

（1）作为直接用于检测的标准器

由于它的高精度与高稳定性，其最高产品已作为国家平面角标准，其他产品则大量地在各级计量和检测部门得到应用，主要用于检测各级棱体标准，标准角度块，标准光学棱镜，各类高精度圆分度器、转台及其他精密测角器件。

①各类奇偶数端齿分度台的开发解决了各种高精度转台和圆分度器对检测点的要求。

②精密端齿分度台与高精度数显自准直仪、多面棱体等与双频激光比长仪组合，组成全套圆分度测量系统，用比较法或全组合法进行检定，并已被用户广泛地应用于各种高精度转台包括大型程控机床转台的检测工作，最高检定精度可达 0.5″以内。

③应用两套分度盘或两台分度台差动，可使精密端齿分度台提供较小隔值的标准分度值。同时与 0.1″数显自准直仪组合即可组成任意角的测角系统。

④由于端齿分度器件的高可靠性，并具有对周围环境变化影响较小的特点，因此这种标准器件深得一些特殊用户青睐。如检测光学零件，作为高低温试验的标准器，适应于高频率重复性工作，甚至可作为加速度器上的定位工装。

（2）作为直接定位和分度用加工装置

程序控制机床的各类刀架和工位转台均采用了这一技术。随着技术进步，精度已由分级发展至秒级，其工作母机使用的精密端齿分度器件已高至 0.1″级。同时工作状态也已多样化。如台面不升降、工位台细分等均已广泛使用。这里值得提出的是：有不少用户在现有机床条件下，为使零部件加工获得较好的分度精度，采用精密端齿专用分度台作为工装，精化现有机床分度精度，以取得较好的加工效果和良好的经济效益。这对批量加工、精度高、能适合于分度台分度加工的典型零件均可推广应用。（如框架镗孔、垂直度加工、平行度加工等）

（3）专用测试与加工设备的开发应用

它是精密端齿分度技术结合现代技术手段、专业应用性很强的深层次开发。

①检测各类计量器具用的标准测量仪

为克服端齿分度台不能连续工作的缺点，根据使用对象要求，国内外相继出现了多种细分机构（丝杆、楔块、感应同步器、光栅、激光等），具有测角精度高，操作方便等优点。其中国内开发的加激光小角度干涉仪的细分台，仪器整体精度为 0.3″左右；加精密楔

块的细分台，仪器整体精度不超过1″。

其他如20世纪80年代由中国科学院光电所研制了光电度盘检验仪、中国计量院和哈尔滨量刃具厂共同研制生产的锥度测量仪、由中国计量院研制的标准齿轮分度精度测量仪等。

②惯导器件测试设备

用于惯导器件的综合测量，特别在加速度计检测方面得到广泛应用。如多齿分度台自动定位陀螺加速度表测试台，利用高精度端齿分度台作为定位测角元件的双轴位置转台，用于高精度陀螺的位置法测试和高精度加速度计静态测试。

2.9.2 端齿盘的种类及基本结构

端齿盘分度装置的结构形式有很多，使用要求也各不相同，但从工作原理上分析，其结构一般由以下几部分组成：上齿盘、下齿盘、松开锁紧机构、回转轴系、底座等。

上下齿盘是核心部件，起到了标准角度输出和精密圆分度作用，它的结构设计和加工精度直接决定了端齿盘分度装置的工作精度和使用性能。松开锁紧机构和回转轴系的主要作用是：①将上齿盘松开后并抬起一定的高度使上下齿盘脱离啮合状态能进行相对旋转，分度结束后又能带动上齿盘平稳下降并锁紧；②为啮合端齿盘提供合适的、均匀的、恒定的轴向啮合力，保证端齿盘承受一定的工作载荷；③根据分度角使上齿盘相对下齿盘进行旋转分度。松开锁紧机构设计是否合理直接影响端齿盘分度装置的使用性能，端齿盘锁紧时要保证锁紧力不会对齿盘正常啮合产生干扰，从而影响端齿分度装置的工作精度。底座是端齿盘的安装基准，是连接各部件的纽带，同时也是端齿分度装置使用时的安装基准。

按照齿盘回转轴系的布置方式端齿盘可分为立式、卧式及立卧两用等，按照操作方式可分为手动端齿盘和电动端齿盘，其中电动端齿盘是指上下齿盘松开脱离、分度回转、下落锁紧等动作靠电机自动完成，主要用于在特殊环境下进行的试验（例如在高低温箱中对加速度计进行测试时无法开箱进行分度操作）或者与作为数控加工设备的第四轴使用需要进行自动运行等。图2－48为三种典型的端齿分度盘的结构，其中图2－49（a）、（c）所示为卧式结构，分别采用螺旋锁紧方式和碟簧锁紧方式，采用这两种锁紧方式还需要增加另外的齿盘抬起机构保证上下齿盘的脱离，例如可利用压缩弹簧推动上齿盘等；图4－49（b）所示为立式结构，采用偏心轮锁紧方式，这种结构同时也可利用偏心轮直接推动上齿盘脱离啮合而不需要额外增加抬起机构，而且可以获得较大的抬起力，特别适用于立式或立卧两用端齿盘。

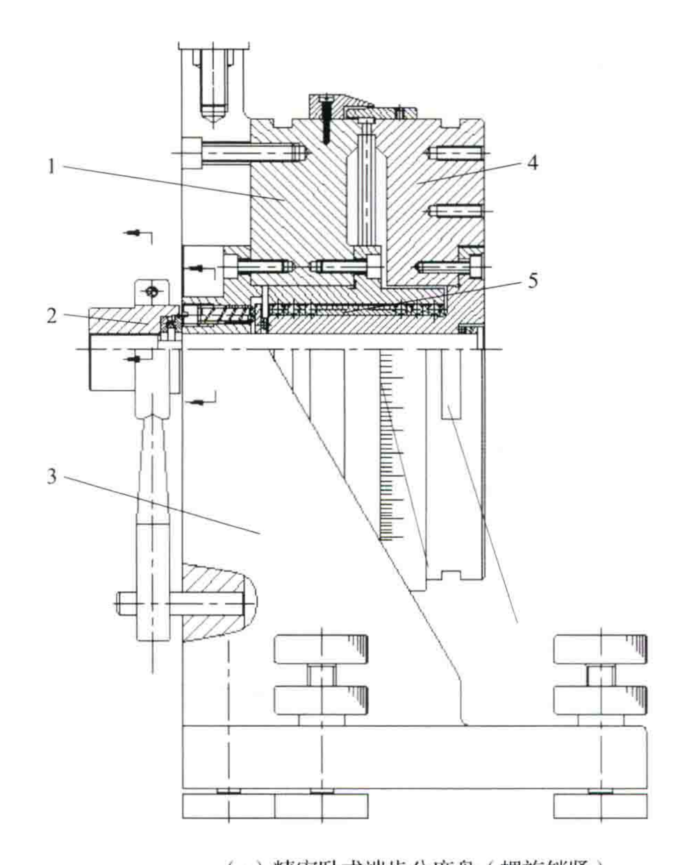
此外根据不同的使用条件或使用场合，还有几类特殊结构或用途的端齿分度盘。

（1）差动端齿分度盘

标准端齿分度台最大的不足是最小分度角受到齿盘直径和制齿工艺的限制。根据目前的加工水平，即使采用造价昂贵、齿数为1440的分度台，也只能满足分度角度尾数15′的要求。因此人们考虑利用差动分度原理设计差动分度台。

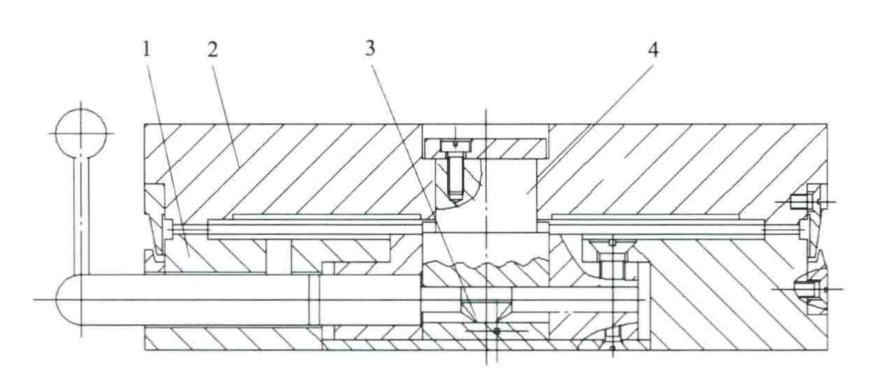
国内外现有的差动端齿分度台的主要结构特点是齿数不相等，同轴重叠配置的两对端齿盘。通常分为上、中、下三个端齿盘，其原理结构如图2－49所示。两对齿盘借助手柄可以分离、啮合和锁紧。当齿盘分离时能绕共同轴线旋转。下齿盘与底座固连并固定在机床或检测台上，上齿盘与安装用工作台固连，用来装夹工件或被检测物体。

假设上对齿盘的齿数为 Z_1，下对齿盘的齿数为 Z_2，其差动分度过程为首先抬起（分离）上齿盘并沿顺时针方向转动 α_1 角（对应着 X 个齿），再抬起中齿盘（使其与上齿盘成“空间啮合”状态）并同上齿盘一起相对于下齿盘沿逆时针方向转动（称之为“牵连运动”）α_2 角（对应着 Y 个齿），然后同时落下上、中齿盘并最后锁紧。这样，上齿盘相对于下齿盘和底座的实际绝对转角 α 可用下列公式计算而得，这就是差动分度的分度值。



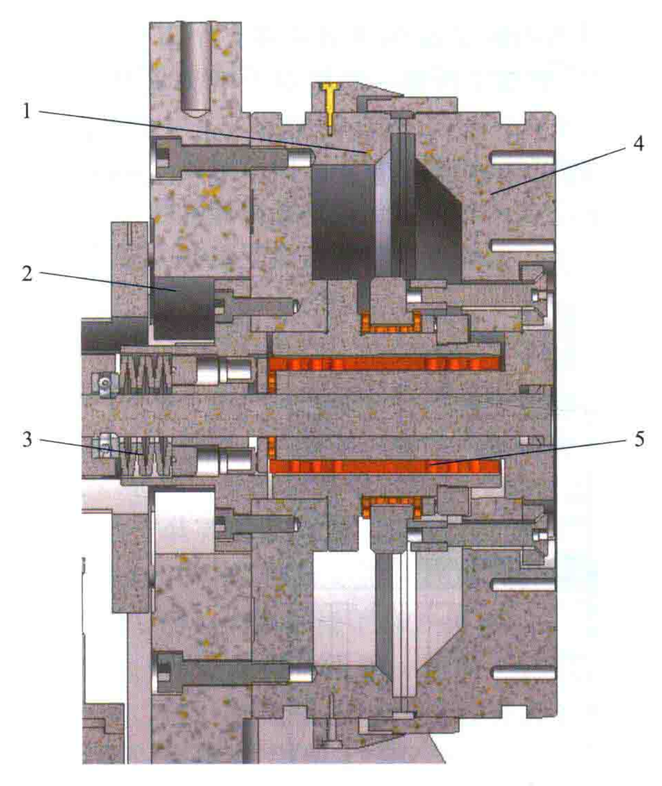
（a）精密卧式端齿分度盘（螺旋锁紧）

1—下齿盘；2—螺旋锁紧机构；3—底座；4—上齿盘；5—密珠回转轴系



（b）精密立式端齿分度盘（偏心轮锁紧）

1—下齿盘；2—上齿盘；3—偏心锁紧机构；4—回转轴系



（c）精密卧式端齿分度盘（碟簧锁紧）

1—下齿盘；2—底座；3—碟簧锁紧机构；4—上齿盘；5—密珠回转轴系

图 2－48　三种典型的端齿分度盘结构示意图

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 = \left(\frac{X}{Z_1} - \frac{Y}{Z_2}\right) \times 360° \qquad (2-7)$$

例如上齿盘齿数 Z_1 为 720 齿，下齿盘齿数 Z_2 为 721 齿，利用上述公式计算可以得到差动端齿盘的最小分度值可以达到 $\alpha = 2.5''$。可见，利用差动分度方法比用普通单对齿盘分度所得到的最小分度角小得多；差动分度的最小分度角取决于两对齿盘的齿数 Z_1 和 Z_2。理论上可以利用三对或三对以上的端齿盘进行多级差动分度得到极微小而且精确的最小分度角，但因其结构复杂、操作麻烦、难以实现，没有实用价值。

（2）带细分装置的连续分度端齿盘

端齿分度盘的最大缺陷是分度局限于齿牙间隔角度值，不适用于对不等分的任意角度分度。单独使用整数分度仍可以保持齿盘原来的分度精度，上面提到的差动端齿盘可以部分解决这个问题。通过端齿盘附加的细分装置的设计可以将圆周细分到任意角度，该装置虽然不能满足任意角度的分度要求，但与光电自准直光管等小角度测量装置联用，可以解决任意角度的测量问题。这套系统的优点是分度精度高，不需要高精度的旋转轴系。连续分度盘端点原理见图 2－50。

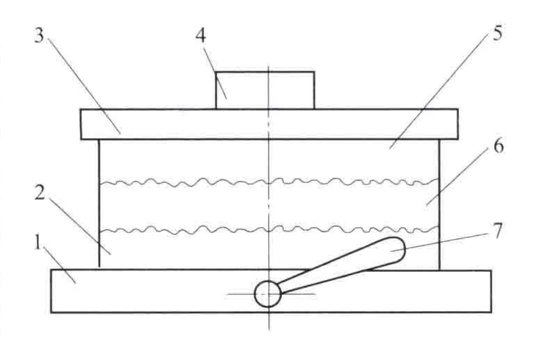


图 2－49　差动端齿盘结构示意图

1—底座；2—下齿盘；3—工作台；4—工件；5—上齿盘；6—中齿盘；7—操纵手柄

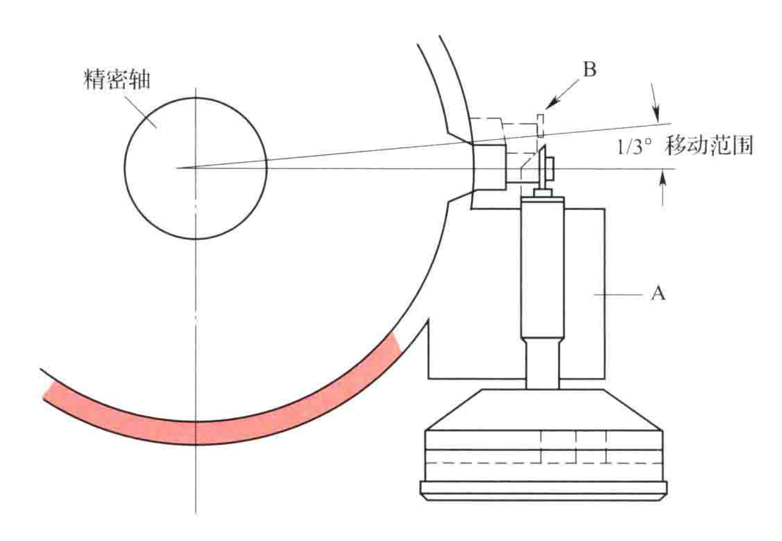


图 2－50　连续分度端齿盘原理示意图

端齿盘通过一带预加载荷的精密密珠轴系固定在辅助工作台上，绕齿盘的轴线回转时具有极高的轴向和径向精度。滚轮安装于分度盘的基座上，并由一个压力恒定的弹簧将滚轮与微调机构前端的平面精密接触，微调机构的行程范围要保证端齿盘在一个齿的范围内能够进行微调，由于需要微调的角度仅为 360°/Z（Z 为端齿盘的齿数），所以回转精密轴系的精度在如此小的范围内基本不影响最终的分度精度。

（3）双齿圈式工作台不抬起端齿分度台

普通端齿分度台多为工作台抬起式，即在分度时工作台需抬起一个齿高才能转动工作台进行分度。由于工作台的抬起不仅影响端齿分度台本身的质量，而且在使用中常会带来很多麻烦甚至无法克服的问题，使端面齿分度台的进一步扩大使用受到限制，双齿圈式工作台不抬起端齿分度台则可以很好地解决上述问题。同时该种结构由于密封性好，特别适用于零件的机械加工等场合。

该种端齿分度台的结构原理示意图如图2－51 所示，下齿盘分成内外圈，外圈与工作台连成一体，起转动分度作用；内圈与底座连成一体，来确保上齿盘重复定位时位置不变。上齿盘内外圈设计成整体，它与多头升降螺杆连接成一体，可在工作台内腔上下移动。当转动手柄时，带动多头螺母旋转，多头螺杆由于不能转动而向上移动，使上齿盘脱开，工作台得以旋转分度。反向转动手柄时，上齿盘落下与下齿盘内外圈啮合，工作台由于下齿盘外圈与上齿盘啮合，而上齿盘又通过与下齿盘内圈的啮合与底座被锁成一体。

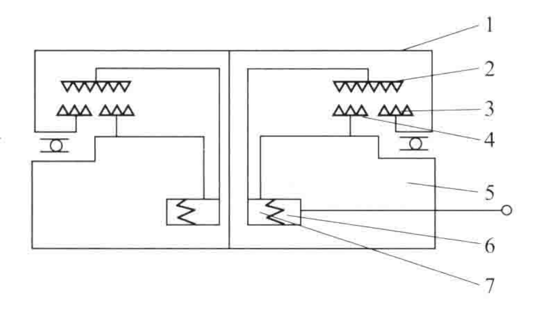


图 2－51　双齿圈式工作台不抬起端齿分度的原理

1—工作台；2—上齿盘；3—下齿盘外圈；4—下齿盘内圈；5—底盘；6—旋转螺母；7—升降螺杆

2.9.3　端齿盘的加工

为了获得较高的分度精度，端齿的研磨是目前端齿盘加工必需的最终工序。同时不断提高研

磨加工前的齿盘精度是非常重要的，否则会给研磨加工带来很大的困难，甚至使齿形变坏，分度精度降低。

研磨前齿盘的加工工艺目前一般采用铣削或磨削，其中铣削是常用的工艺。铣削和磨削时都需要“母盘”作为分度基准，母盘的分度精度直接决定了研磨前的齿盘精度，所以母盘可以用高精度端齿盘或转台。如果没有高精度的母盘，也可以采用“盘翻盘”的方法，例如可以从铣床回转台开始，经多次翻制，逐步获得高精度的端齿分度盘副。无论是铣削还是磨削加工过程中都注意刀具的磨损、齿盘倾斜角的控制等。

研磨是保证端齿盘分度精度的关键工序，最重要的是研磨加工过程中不能干涉上齿盘和下齿盘的自由啮合。上、下齿盘装夹变形，基准面的选择，研磨方法等都是影响最终齿盘精度的因素。

一般普通研磨设备采用如图 2－52 所示的撞击式研磨方法，下齿盘固定在工作台面上，上齿盘垂直地抬起、落下。上齿盘往复运动的整个行程中，仅在落下转为抬起的瞬间发生研磨，研磨效率低；齿面间研磨砂用乏后，无法自动地添加，进一步降低了研磨效率；在微观尺度上，其研磨机理以压陷、凿削为主，齿面微观形貌较差，难以加工出高精度端齿盘。

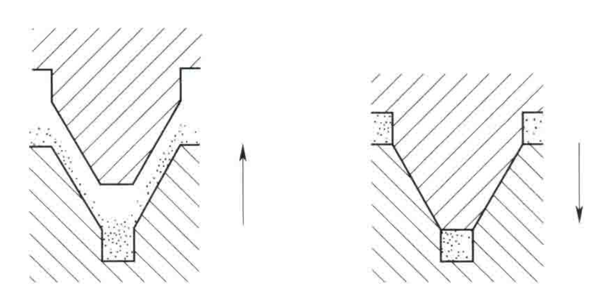


图 2－52　普通研磨设备采用的撞击式研磨方法

在此基础上进行齿面研磨设备及工艺改进，原理如图 2－53 所示，在上齿盘上固定一根弹簧，施加一个恒定的切向力 P。上齿盘往复运动的行程中，齿面 A 始终与下齿盘贴合，研磨效率较高，为使齿面 B 磨削量相同，需定时将切向力 P 手动换向，设备自动化程度较低；研磨过程中，齿面始终贴合在一起，研磨砂不能及时地添加，研磨效率的提高是有限的；在大小恒定的切向力 P 的作用下，会产生类似平面研磨的塌边现象，造成齿顶变尖，影响端齿盘的加工精度。

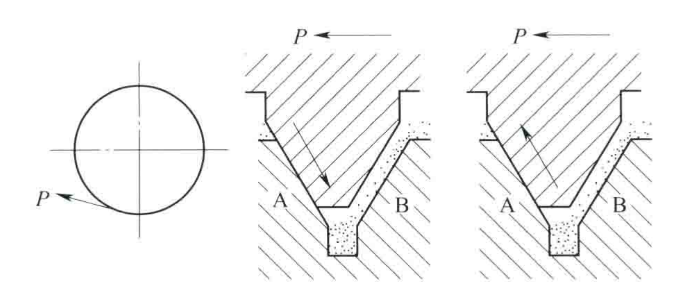


图 2－53　普通研磨设备采用的改进型研磨方法

针对上述问题，探索设计了一种全新的端齿研磨加工方法，其目的是提高端齿盘的研磨效率和加工精度，原理如图 2－54 所示。齿面研磨系统通过摆动机构使齿面 A、齿面 B

交替地贴合研磨；为了避免齿顶变尖造成的精度问题，通过摆动机构改变切向力大小，在啮合面积增大时增加齿面间正压力，啮合面积减小时降低齿面间正压力。这种研磨工艺的特点在于：首先研磨过程中始终有一侧齿面在正压力的作用下研磨，研磨效率较高；其次上齿盘沿一侧齿面抬起、落下一个行程后即研磨另外一侧齿面，研磨砂更换及时，进一步提高研磨效率；再次，正压力大小根据啮合面积变化，避免造成齿形变尖的问题，加工精度较高；最后，在微观尺度上，其研磨机理以刮擦、切削为主，齿面微观形貌较好，有利于研磨出高精度的端齿盘。

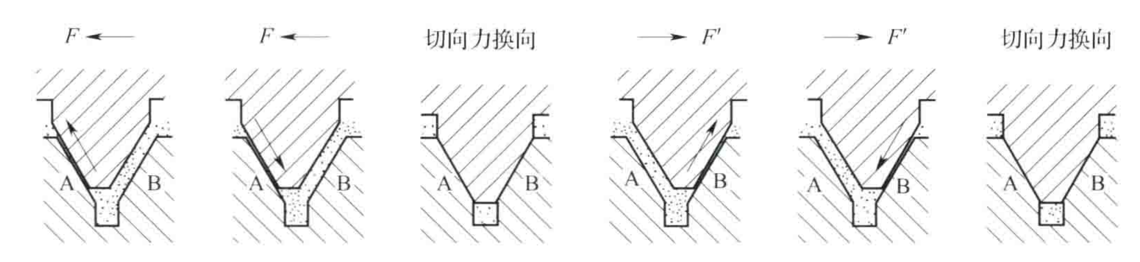


图 2－54　高效精密齿面研磨方法

为了实现上述高效齿面的研磨，需要研磨设备能够实现齿盘的上下运动与摆动的联动以便完成 A、B 齿面的研磨，该运动可以通过伺服电机控制来实现，但为了降低成本、简化结构、提高可靠性，可以采用凸轮及曲柄摇杆等机械结构来满足上述运动要求，结构原理如图 2－55 所示。

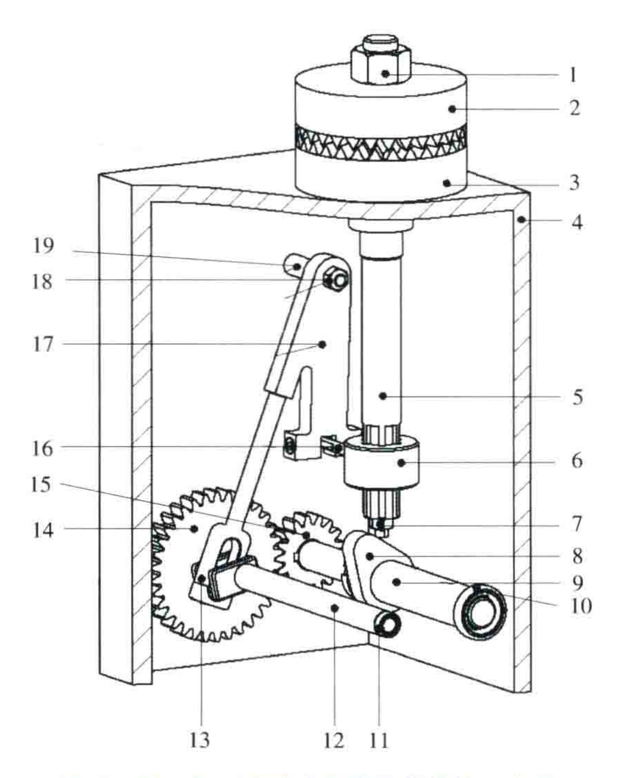


图 2－55　新原理端齿研磨设备结构示意图

1—上齿盘锁紧螺母；2—上齿盘；3—下齿盘；4—基座；5—垂直轴；6—花键轴套
7—调整螺母；8—凸轮；9—水平轴；10—轴承；11—轴承；12—曲轴；13—拨叉
14—从动齿轮；15—主动齿轮；16—推杆；17—摆杆；18—固定螺母；19—摆动轴

下齿盘（3）固定在基座（4）上，上齿盘（2）随垂直轴（5）运动，该运动是由垂直运动分量和左右摆动分量合成的。垂直运动分量为研磨主运动，其作用是带动上齿盘往复地抬起、落下；左右摆动分量为研磨进给运动，其作用是提供方向及大小按规律变化的侧向力。水平轴（9）为主动轴，动力在其上分为两个路径传递。路径一，水平轴（9）带动凸轮（8）回转，凸轮（8）推动垂直轴（5）上下往复运动，即垂直运动分量；路径二，水平轴（9）带动主动齿轮（15）回转，主动齿轮（15）与从动齿轮（14）啮合，从动齿轮（14）带动曲轴（12）回转，曲轴（12）（曲柄）、拨叉（13）（摇块）和摆杆（17）组成曲柄摇块机构，将曲轴（12）的整周回转运动转化成摆杆（17）绕摆动轴（19）的左右摆动，摆杆（17）推动推杆（16）绕垂直轴（5）的中心线左右摆动，推杆（16）通过花键轴套（6）推动垂直轴摆动，即左右摆动分量。

第3章　典型超精密加工设备的发展及关键技术

3.1　概述

3.1.1　先进超精密加工机床的特点

传统的光学系统因设计、计算和加工、制造技术所限，其结构和元件形状都较简单，光学元件形面通常为平面、球面。传统的光学元件加工时，采用大数、无规则轨迹控制和均化效应等工艺，配合检测，可获得良好的超精密的加工效果。这里加工精度依赖的是工艺方法，而不苛求加工机床本身的精度，低机械精度的加工机床仍可达到高的光学元件加工精度效果。这类机床通常也被称为“非确定性”加工机床。采用传统加工方法的“非确定性”超精密加工机床只适合加工球、平面等简单形状和玻璃类硬脆材料的光学元件。

随着现代科技的发展，特别是光电子技术、计算技术的发展，当今的光学应用系统无论光学元件形面的复杂性、材料的多样性、小和大两方面的几何尺度都有了巨大的发展变化。传统的“非确定性”超精密加工机床和工艺方法已不能适应现代光学系统元件加工需求：或是根本无法加工，或是加工效率极低。

随着“确定性”超精密加工机床系统的出现有效地解决了上述问题，这类超精密加工机床主要包括两种类型：第一类是利用可控制刀具（如金刚石刀具），以极高精度的空间运动轨迹直接加工成形具有光学镜面效果的产品，如单点金刚石超精密车床、超精密磨床等；第二类是利用可控的去除函数，在相对确定的位置进行确定量的材料去除从而得到高精度高表面质量的产品，如小磨头抛光设备、磁流变抛光设备、气囊抛光设备等。具有上述性能的超精密机床不仅使加工效率得到了极大的提高，还可实现传统方法难以加工处理的金属基、光学晶体等材料，以及非球类复杂面形元件的超精密加工。由于第二类超精密加工机床的精度相对不高，零件加工精度与工艺过程密切相关，所以本章主要涉及以单点金刚石车床为代表的超精密切削设备。

超精密机床的高确定性取决于对影响精度性能的各环节因数的控制。这些控制品质常常要求达到当代科技的极限：如机床运动部件（导轨、主轴等）极高的运动精度和可控性（如摩擦、阻尼品质）；机床坐标测量系统极高的分辨率、测量精度和稳定性；运动伺服控制系统极高的动、静态加工轨迹跟踪和定位控制精度等。此外，还要求数控系统具有高性能的多轴实时控制及数据处理能力；机床本体的高刚性、高稳定性和优良的振动阻尼；为了防止环境振动和加工中机床姿态微小变化影响，机床还需安装隔振、精密自动水平调整机构等；环境因素对超精密加工影响极大。特别是大型超精密加工机床环境控制极为严苛：除了地基振动控制外，对机床本体液体温控、环境空气流场、温度控制，以现有的科技手段，无论要求多高都不为过，甚至声场及任何可能对机床状态产生微小扰动的因

素都要进行严格控制。

纵观国内外40多年超精密机床发展史，可以总结出两大特点：一是大学和研究所保持着对超精密机床研究的持续热情，对高技术进行超前研究，对超精密机床产业化和商品化起着推动的作用；二是超精密机床的模块化、系统化是其进入市场的重要技术手段。

3.1.2 先进超精密机床领域发展趋势

超精密机床技术的发展趋势总体上向极端化、智能化、绿色化、服务化方向发展。极端化是指机床的研制向极限制造技术方面发展，如更高精度、更高性能和效率、极限尺度加工、面向极端环境等；智能化是指机床无论在硬件还是软件上的功能具备智能化和信息化特征，如在工况感知、性能预测、工艺规划、伺服驱动、系统控制与维护等方面；绿色化是指在机床从设计、制造、运输、使用、维护以及报废过程的全生命周期中综合考虑环境影响和资源效益，实现环境友好和资源效益的最佳化。这里面需要考虑多项相关技术，如设计、制造、材料等的绿色化技术；服务化是指制造商和专业服务商逐渐重视售后服务支撑技术的开发，必要时实施远程的在线服务，服务功能趋向集成化、信息化。需要指出，极端化、智能化、绿色化、服务化并非完全独立，而是具有相互融合性。

超精密机床的发展还可以具体归纳为向高精度、高可靠性、高效率、小体积、低成本、低能耗等方向发展。但是需要指出的是，超精密机床应用范围不如普通精密机床广泛，前者主要是面向尖端科技领域，对其而言，精度、可靠性和效率的保证是主要目标，其他方面诸如成本、能耗、体积等目标的最优实现是次要目标。因此，在超精密机床的总体发展趋势中，极端化的重要性要高于智能化、绿色化、服务化。

英国克兰菲尔德大学分别在1989年和2006年研制出两台功能相近的机床，OAGM 2500和BOX® 机床（参见图1－8和图1－9）。它们同属大型光学元件加工的超精密机床，然而在结构设计、功能性和研发成本方面都有很大的不同。OAGM 2500是针对Keck望远镜（20世纪世界上最大的望远镜）的镜面加工而设计，总共投入180万英镑（1989年），整机质量为120t。而具备相似生产能力的BOX® 机床是基于EELT（欧洲超大望远镜，预计在2020年成为世界上最大的地面望远镜）项目，其总投入只有150万英镑（2013年），整机重量降低至15t，而且加工对象范围大幅度提高，可加工涵盖KDP、ULE、Zerodur、SiC等多种材料的光学元件。这是通过采用人造花岗岩作为床身材料，以及对大量先进的机床零部件的采用（如直线电机、迷你激光干涉仪、空气轴承LVDT探针等）而实现的。总体上讲，超精密机床在继续追求精度提升的同时，也在努力加强结构紧凑性，降低成本和能耗，提高通用性和可靠性，即在追求极端化的前提下追求智能化和绿色化。

过去的20年里，在精密微小零件和微结构加工方面，很多研究项目致力于研发微小型机床。传统的超精密金刚石车床如Precitech FreeForm 700和Moore Nanotech 350FG等，成本高而适应性有限，限制了其经济实用性。工业化微铣削精密机床如Kuglar MicroMaster MM2等，虽然应用广泛，但是受制于位置精度，且占用体积大。微小型机床的优势是占用体积小，能耗低，局部环境容易控制，机动性强，具有很高的成本效率比。基于上述发展趋势，克兰菲尔德大学从2008年开始研发Integ－μ4机床（见图3－1），其目标是将车、铣、钻、磨的功能结合，且自动化地实现从车削到铣削的无缝转换，实现功能复合化和高效化，其整机尺寸和欧洲标准的洗衣机相当，具有小体积和低能耗特点。



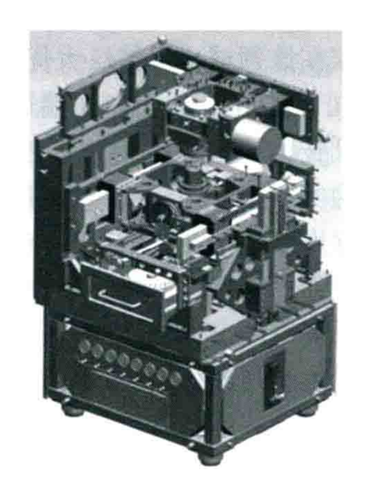


图3-1　Integ-μ4超精密机床

超精密加工技术最终是要解决人类科研和工程领域的重大难题，因此超精密机床的发展方向始终要面向世界性前沿科学项目，例如超大望远镜EELT、激光核聚变工程NIF（我国的“神光”SG系列）、极紫外光刻机EUVL等。以EELT为例，其主镜直径近40m，需要加工子孔径为1.45m的镜面达798块。20世纪90年代，Keck望远镜中每块子镜的平均加工时间为一个月，以此速度来制造EELT，到2020年其主镜部分的加工仍很难完成。

针对该问题，BOX@机床的研发应运而生，同时克兰菲尔德大学保罗·肖尔教授提出了一套针对大型镜面加工的工艺链：第一步，运用BOX@磨床进行磨削，得到1μm的RMS面形精度；第二步，运用Zeeko IRP1600设备抛光，将RMS面形误差降低至0.01~0.3μm；第三步，运用克兰菲尔德大学与美国RAPT公司开发的Helios1200等离子体技术进行表面矫正，最终得到RMS面形误差为10nm的超光滑表面。从中可以看出，高效、高质、高可靠等已经是超精密机床和相应工艺发展的重要特征，这也是应对当前和未来重大科学和工程项目挑战的必然选择。

从机床部件和系统发展来看，机床的基座需要具备高刚度、高稳定性和低热膨胀系数等特点，其制造方式将从当前的铸造向数字化制造发展。机床导轨的研磨从当前的手工研磨、刮研、抛光向自动化研磨转变，并将利用实时补偿的轴承装置，导轨运动精度将会不断提高，其稳定性和可靠性也会继续提高，稳定的直线度将小于0.1μm/m。直线和旋转轴承需要保证高刚度、优阻尼、无黏滞，将从当前的滚动、气体静压、液体静压、电磁轴承向具有主动补偿功能的气（液）流体膜轴承和超导电磁轴承发展。

此外，作为提高超精密机床精度的两种基本方法之一的误差补偿及其相关支撑技术也是一个具体的发展点，尽管其对超精密机床精度的提高作用有限，但是其对机床精度的小幅提高和稳定性保持仍具重要意义，这也是智能化发展的需要。对此领域已有大量的研究，但是受限于误差测量辨识、控制等原因，在工业中的真正广泛应用还不多，未来的发展主要围绕动态误差补偿问题，追求实时性、复合性、高效性，如实时补偿器研制、复合误差建模和补偿、考虑温度变化的机床误差高效测量等。

3.1.3　超精密机床国内外的差距及发展策略

目前，在超精密机床技术研发上具有领先地位的主要是美国、英国、日本、德国等国家，典型的研发机构代表是美国的LLNL实验室和英国克兰菲尔德大学的精密工程研究

所。这些发达国家在该领域也保持巨大优势，发展也非常迅速，典型代表如美国的摩尔公司和Precitech公司，已占据了众多高端市场。他们不但在整体水平上与我国拉开差距，更重要的是在基础技术研究水平上也高度领先。我国在超精密机床领域，尚未形成产业化，个别机床仅为实验室专用。我国超精密机床存在的突出问题可以概括为：自主开发能力薄弱，对外依存度高，专业化的配套体系尚未形成，功能部件发展滞后，产品自动化水平低，可靠性、精度保持性差，机床的软件系统开发能力有限，相关服务业发展缓慢，没有形成科学性的发展思路。

超精密机床设计时需要综合考虑在宏观、介观和微观等多尺度、多因素情况下的性能分析与优化。我国目前的超精密机床设计往往只针对具体应用的精度需求，先进行系统结构布局设计与分析，缺少部件间动态综合、整体系统的无缝解析和系统的优化设计。往往是“具体应用—经验驱动”，尚无任何机床系统集成设计理论体系和方法。国内外公开文献中，很少具体涉及超精密机床的系统集成设计理论与方法，部分原因在于发达国家对本领域的技术保密和封锁。因此，我们需认清形势，加大投入进行自主研究，以求在超精密机床的设计理论和研发水平上缩短与国际本领域最高水平之间的差距。

3.1.3.1 超精密加工机床国内外的差距

（1）设备的总体性能

对于一些复杂形状的零件加工，需要两轴以上的超精密加工设备才能完成，例如Precitech公司和摩尔公司已商品化生产五轴超精密切削加工设备，而国内的金刚石切削设备相对成熟的只有两轴至三轴，而且研发的多轴加工设备性能不稳定，总体精度指标与国外设备存在较大差距。

（2）综合精度指标及稳定性

国内研制的超精密切削加工设备无论是主轴还是导轨的单项技术指标与国外商品相比已经接近，但是从设备的总体技术指标来看还有一定的差距。国内加工机床的面形精度虽然也可以达到亚微米级，但是对加工条件要求苛刻，更重要的是不能稳定地达到亚微米级的面形精度。

（3）控制系统方面

美国摩尔公司的Nanopath和Precitech公司自行开发的UPx™ Control System等，都已经在各自公司生产的设备上得到了很好的应用。国内研制的超精密加工设备中的控制系统有的是自行开发的，也有的是直接引进的通用型数控系统，无论是控制系统的性能还是软件等方面都存在着较大的差距。

（4）超精密加工设备的可靠性

国外加工设备的商品化已经20多年，产品的成熟度和可靠性非常高，都已经经历了时间和市场的考验。而国内目前大多数研究单位只是进行了一轮样机的研制，还有很多基础技术不成熟，设备可靠性差。

（5）外观造型设计及人性化设计

国产设备在外观造型设计及人性化设计方面与国外产品存在较大差距。

（6）机床附属功能

国外超精密加工设备上都有一些附属但同时又是必须的附件和功能，可以使操作者能够非常轻易地实现零件的加工，如刀具测量与调整系统、工件误差在位测量系统等。而国

内研制的这些超精密加工设备大多只能依靠操作者的经验和技能实现基本的加工功能。

（7）基础元部件

国外超精密基础元部件都有专业的生产厂商，如英国 Loadpoint 公司专业生产超精密主轴、超精密导轨，德国 Hyprostatik 公司专业生产液体静压主轴、液体静压导轨以及液体静压丝杠等基础元部件，已经形成系列化、标准化。而国内生产的驱动电机、编码器、光栅等元部件在性能及可靠性等方面与国外存在较大差距，只能依赖于进口，但又受到种种限制。

（8）机床的集成技术

从高精度零件的加工，主轴导轨等部件的装配，到整台设备的装配及系统调试，也存在着较大的差距。

3.1.3.2　超精密加工机床的发展策略

超精密加工机床的研究和发展的重点应集中在设计、制造、控制、检测和工艺试验等方面。

（1）超精密机床设计理论与方法

①超精密机床系统建模及优化设计理论与方法；

②超精密机床的多尺度、多层次耦合特性分析及模型解析；

③超精密机床精度设计理论与多因素影响机制；

④超精密机床环境设计理论与方法。

（2）控制系统设计与智能化方法

①超精密机床运动系统控制理论与方法；

②超精密机床的运动轨迹优化理论与方法；

③超精密机床性能在线观测与智能化技术；

④超精密机床复杂系统多因素耦合最优控制技术；

⑤超精密机床动态复合误差实时补偿技术；

⑥控制系统硬件及集成技术。

（3）基础部件制造与集成

超精密机床的基础部件技术需要推进气体（液体）静压主轴、气体（液体）静压导轨、隔振系统、直线电机全闭环驱动、压电（电致、磁致）微伸缩伺服系统、高精度光栅尺、激光干涉仪等产品的自主研发及产品化技术。理论研究方面的重点在于：

①高精度、高速、智能化运动部件的系统化设计方法；

②高阻尼、高刚度、高精度运动部件设计理论与方法；

③智能化刀具系统的设计理论与方法；

④超精密环境控制部件的集成化设计方法；

⑤超精密基础元部件制造及装配工艺。

（4）超精密机床检测理论与方法

尽管国际标准组织 ISO 和国家标准化管理委员会已对精密机床的误差检测等制定了许多标准，国内外学术和工业界也提出了许多检测理论和方法，但是对于面向特殊功能需求的超精密机床、复杂多轴超精密机床等，现有的标准、理论和方法的适用性受到限制，应继续加强该方面的研究工作，不断满足新的需求。理论研究方面的重点在于：

①超精密机床的多性能检测理论与方法；

②面向功能需求化的检测技术标准；

③复杂物理场下多因素检测理论与方法。

超精密机床技术特别是母机的设计制造依赖于物理、化学、力学和材料科学等多学科的发展，也跟机械制造、计算机、仪器测控技术密不可分，因此在研发新一代超精密机床中也需要密切关注学科交叉技术，充分考虑与它们的最优融合性。

3.2 超精密加工设备研制关键技术

精密、超精密加工设备的设计是通过对加工工件的形状、尺寸、精度、材料特性及刀具、加工效率等的分析，并通过对机床元部件技术、控制技术、材料技术、环境技术、生产技术等关联技术的综合研究，确定与加工目的最适合的机械结构。对于用于超精密加工的机床设计来说，必须采用不同于精密加工机床的特殊方法，才能满足超精密加工要求。

目前精密加工设备（微米级精度）一般由各大机床制造厂商提供货架式商品，用户根据加工需求进行选择订购。如果用户有特殊加工需求，如加工工件的规格尺寸特殊、材料特殊、工艺特殊等可以由机床厂商为之量身设计制造专用设备，这种设备一般称为非标设备。

对于超精密加工设备（0.1μm 以上精度）情况有些类似，一种是通用性设备，一种是专用于某类产品或某工序加工的专用设备。生产通用性超精密加工设备的厂商较少，在全世界范围内仅有几十家，大部分集中在美国，少量在欧洲和日本。如美国摩尔公司、Precitech 公司等生产的超精密切削设备，SatisLoh 公司、Optech 公司生产的光学铣、磨、抛设备等，这些机床要求功能齐全、精度高，但是价格较昂贵。专用的超精密加工机床，如磁盘车床、KDP 超精密飞切加工机床、多面体超精密铣床、大口径非球面反射镜研抛机等。这种机床结构较为简单，价格相对便宜，但功能单一，可加工零件种类较少，而且需要单独专门设计，研制周期长、不能快速响应用户的需求。

3.2.1 超精密加工设备设计基本原则

（1）精度先行和精度优先原则

在设备总体设计时，必须严格地以保证设备最终精度为中心。所以超精密加工设备的总体结构、主轴导轨等基础元部件、位置测量及反馈系统、进给系统、控制系统、软件、设备附件、环境等设计时，不能以降低设备精度为代价，这是超精密加工设备设计时应遵循的最基本也是最重要的原则。

（2）刚性同步考虑原则

当加工精度达到微米或亚微米级时，原本从表面看来是刚体的机床实际上变为了柔性体，亚微米级的微小位移随处存在，所以设计研发超精密加工设备时，精度和刚度是统一的，需要将两者综合考虑。

（3）结构的简洁性原则

为了获得高刚度结构，超精密加工设备结构必须尽量简单，传动环节尽量少。首先因为随着传动环节及元件数量的增加，尺寸误差会随之增大，系统刚性减弱；其次结构越复杂，作用力在传递过程中受弹性变形和热的影响就变得越复杂，运动误差越大。设备精度越高，其结构应越简单，这是超精密加工设备设计时的一个基本原则。

（4）自动化原则

设计超精密设备时，首先应该考虑的是设备精度，而加工效率不是主要因素，但是为了保证加工条件的稳定和环境的温度控制以及防止加工环境的污染，加工现场应尽量少留人或不留人。特别对于大尺寸构件的加工精度，加工时间也应尽量缩短，所以提高超精密加工设备的自动化正是保证精度优先原则的基础。

（5）误差测量及补偿系统

超精密加工设备的精度主要靠机床的基准元部件精度保证，而机床元部件的精度达到一定程度后继续提高已十分困难，而且一些加工中产生的误差无法消除。从超精密加工的发展来看，利用误差检测及补偿系统补偿设备固有误差及加工中产生的误差就显得十分必要和有效。

（6）模块化设计原则

各类超精密加工设备结构既有共性又有个性，所谓共性是指不同超精密加工设备可以通用的系统如主轴回转系统、直线运动系统、驱动系统、隔振系统、温度控制系统等，而个性是指由于加工工艺和规格等不同造成的机床结构不同，如超精密车削、磨削、铣削等不同加工工艺要求有不同的机床布局结构，为满足机床功能性需求采用多轴设计使机床的结构不同。因此研制各种通用的超精密加工设备基础元部件（模块），再根据不同的需求将相关模块组合成所需的超精密加工设备，可以缩短超精密加工设备的研制周期，降低研发成本，成为在现有条件下发展我国超精密加工设备的一种可行方式。

3.2.2　超精密加工机床研发中的关键技术

（1）机床系统总体综合设计技术

国际上有一种评价，超精密机床尖端的设计、制造技术已升华到一种艺术境界，非常规方法能及。常规机床无论设计与制造，各环节技术上都有很大宽容度。超精密机床各环节基本都处于一种技术极限或临界应用状态，哪个环节稍考虑或处理不周，就会导致整体失败。因此，设计上需对机床系统整体和各部分技术有着非常全面、深刻的了解。需依可行性，从整体最优出发，极其周详地进行关联综合设计。否则，即便是全部采用最好的部件、子系统，堆砌也会导致失败。

（2）高刚性、高稳定机床本体结构设计、制造技术

超精密加工机床，尤其对于大型设备，由于机身大、自身重，承载工件重量变化大，任何微小的变形都会影响加工精度。结构设计除从材料、结构形式、工艺方面达到要求，还须兼顾机床运行时的可操作性。

（3）超精密工件主轴技术

中、小型机床常采用空气静压主轴方案，空气静压主轴阻尼小，适合高速回转加工应用，但承载能力和刚度较小。大型超精密机床主轴承载工件的尺寸、重量大，一般宜采用液体静压主轴。液体静压主轴阻尼大、抗振性好、承载力大，但液体静压主轴高速运转发热大，需采取液体冷却恒温措施。

工件主轴用于速度控制模式时，主轴角度编码器分辨率要求不高。当进行快刀伺服加工或慢拖板伺服加工等需要进行位置控制模式时，为了保证加工工件的表面质量，编码器分辨率要求达到百分之一秒级。为了保证主轴精度和稳定性，无论气压源或液压源都需恒

温、精过滤，并对压力精密控制。

（4）超精密导轨技术

早期的超精密机床采用气浮静压导轨技术。气浮静压导轨易于维护，但阻尼小，承载抗振性能差，现超精密加工设备上已较少采用。闭式液体静压导轨具有高抗振阻尼、高刚度、承载力大的优势。目前国内外超精密加工设备基本上采用液体静压导轨。

（5）纳米（皮米）级分辨率动态超精密坐标测量技术

早期的超精密机床坐标测量系统采用激光干涉测量方式。激光干涉测量是一种高精度的标准几何量测量基准，但是，易受环境因数（气压、湿度、温度、气流扰动等）影响。这类稳定性因素，容易影响刀具控制，从而影响工件的表面加工质量。为此，美国 LLNL 的 LODTM 坐标激光测量回路采用了真空隔离，以及零温度系数的铟钢坐标测量框架的措施，这也是激光坐标测量方面的顶尖应用。

现今的超精密机床坐标测量系统大多采用衍射光栅。光栅测量系统稳定性高，分辨率可达纳米级。为了进一步获得超高的位置控制特性和加工表面质量，采用 DSP 细分，测量系统分辨率可达皮米级。

（6）纳米级重复定位精度超精密传动、驱动控制技术

为了实现光学级的确定性超精密加工，机床必须具有纳米级重复定位精度的刀具运动控制品质。伺服传动、驱动系统需消除一切非线性因素，特别是具有非线性特性的运动机构摩擦等效应。因此，采用气浮、液浮等方式应用于轴承、导轨、平衡机构成了必然的选择。

伺服运动控制器除了高分辨、高实时性要求外，控制方程及模式也需不断技术进步。试验证明：研制系统进行曲面加工控制时，高性能伺服运动控制器执行一阶无差、二阶有差控制，刀具轨迹动态跟踪有滞后现象。这种滞后量虽小，精密加工可不计，但对超精密加工不可忽略。

（7）开放式高性能 CNC 数控系统技术

从加工精度和效能出发，数控系统除了满足超精密机床控制显示分辨率、精度，以及实时性等要求，还需扩展在机测量、对刀、补偿等许多辅助功能。通用数控系统难以满足要求。所以，国外的超精密机床现基本都采用 PC + 运动控制器研制开放式 CNC 数控系统模式。

（8）高精度气、液、温度、振动等工作环境控制技术

①机床隔振及水平姿态控制

振动对超精密加工的影响非常明显，连远处行驶的汽车都有影响。机床隔振需采取特殊的地基处理和机床本体气浮隔振复合措施。机床体气浮隔振系统还需具备自动调平功能，以防止机床加工中水平状态变化对加工的影响，超精密加工机床隔振系统的自然频率一般要求在 1Hz 以下。

②温度控制

温度控制尤其对大型超精密机床极其重要，机床、工件尺寸大，温度对设备及工件的精度影响也大。在同样的切削量和线速度下，大工件的加工周期特别长，温度对加工精度的影响非常大。因此，大型超精密加工机床温控要求极其高。如 LLNL 国家实验室的 LODTM 机床，机床床体采用恒温水液压系统控温，精度达到 0.0005℃，机房空气控温精度达到 0.003℃。由于小零件的加工时间短，温度影响相对较小且易控，对于小型商品化的机床温度控制要求不需太高，一般控制精度为 0.5℃。

（9）机床零部件的加工及系统总装、调试技术

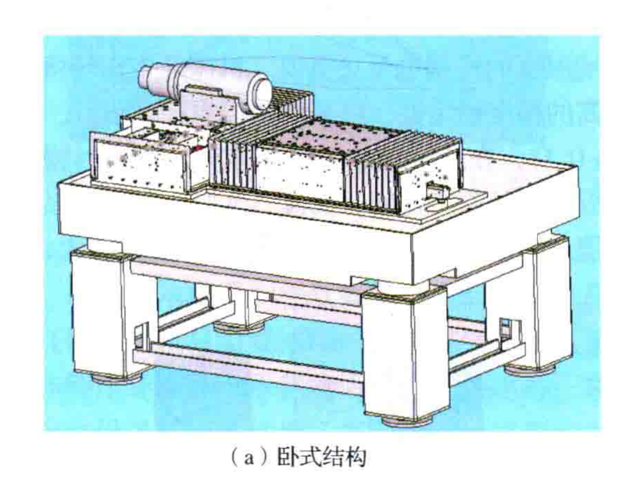
超精密加工设备的主要特点是要求其具有高精度的回转运动及直线运动、各个运动轴之间的高位置精度以及超精密定位控制精度等，关键技术包括高精度轴、孔、平面等特征以及高位置精度零件的加工及检测工艺，超精密轴系及导轨的装配调试、机械系统的总装调试、电控系统的调试、机电系统的联调等。

（10）机床系统性能综合测试、标定及误差补偿技术

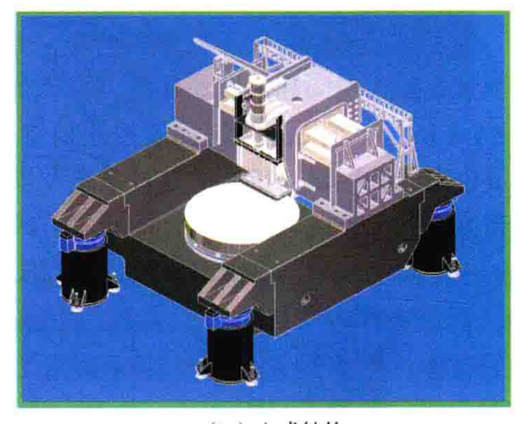
关键技术包括超精密主轴及导轨等基础元部件精度的动静态测试、导轨及主轴系统的定位精度和重复定位精度测试、导轨及主轴的刚度及动态特性测试、机床各运动轴位置精度测试、机床隔振系统性能测试等。

3.3 多轴超精密切削加工设备

多轴超精密切削加工设备是目前最常见的通用超精密加工设备，广泛应用于有色金属、红外以及镍磷合金等材料的单点金刚石超精密切削加工，其结构形式主要包括卧式和立式两种结构，一般加工工件直径在 600mm 以下采用卧式结构，而大于 1000mm 的则多采用立式结构，如图 3－2 所示。按照设备的复杂程度，多轴超精密加工设备可以从最简单的二轴（X 轴、Z 轴）扩展到五轴（X 轴、Y 轴、Z 轴、B 轴及 C 轴，参见图 2－8），其中在 X、Z 两轴超精密加工设备同时利用高精度的圆弧刃金刚石刀具就可实现非球面曲面等回转类零件的超精密加工，而附加其他轴后则可以进行包括非轴对称的复杂曲面或微结构特征的超精密切削加工，极大地拓宽了设备的使用范围。



（a）卧式结构



（b）立式结构

图 3－2　多轴超精密切削加工设备两种典型结构

3.3.1 多轴超精密切削加工设备的总体设计及布局

多轴超精密切削加工设备主要由以下几部分组成：床身底座及隔振装置、导轨及驱动装置、主轴及驱动装置、机床位置测量装置、刀架及吸屑装置、喷雾冷却装置、恒温供液系统、供气系统、CNC 数控系统等。

下面以两轴卧式超精密切削加工设备和立式大型非球面超精密切削加工设备为例介绍多轴超精密加工设备的特点，这两类机床系统机械结构都主要由四个部件组成。底座部

件、X 向液体静压导轨部件、Z 向液体静压导轨部件以及工件主轴部件。

其中立式超精密车床的 Z 向液体静压导轨部件安装在 X 向液体静压导轨部件上，具体说是安装在 X 向液体静压导轨部件的移动滑架上，移动滑架安装在横梁上；X 向液体静压导轨部件安装在其机床横梁上，通过横梁固定在底座部件上。机床系统主要包括三个主运动，其中水平 X 向液体静压导轨用来实现刀具的横向进给。垂直 Z 向液体静压导轨用来安装金刚石刀具，实现刀具的竖向进给。液体静压主轴台面上安装被加工试件，用来实现刀具的切向回转运动。依靠这三者的关联运动完成工件的加工，如图 3－3（b）所示。

卧式超精密车床的 X 轴、Z 轴液体静压导轨则呈 T 形布置在机床底座上，工件主轴布置在 X 轴导轨上，刀具则布置在 Z 轴导轨上，同样利用 X、Z、C 三者的运动完成工件的加工，如图 3－3（a）所示。



（a）卧式结构



（b）立式结构

图 3－3　超精密加工设备实物照片

为了保证超精密加工机床的精度，工作环境温度的控制也至关重要。机床的工作环境为一个具有较大空间和热源的环境，为了获得较高的精度稳定性，可采用两层温控间设计，如图 3－4 所示。核心工作区温度控制精度达到 ±0.1°，在此区域放置机床本体，加工时操作人员也离开此区域；机床的电控系统及操作台放置于外层工作间，而液、气、水等辅助系统都在另外的工作区域内，这样的布置方式尽可能地减小了外部热源对机床主体的影响。

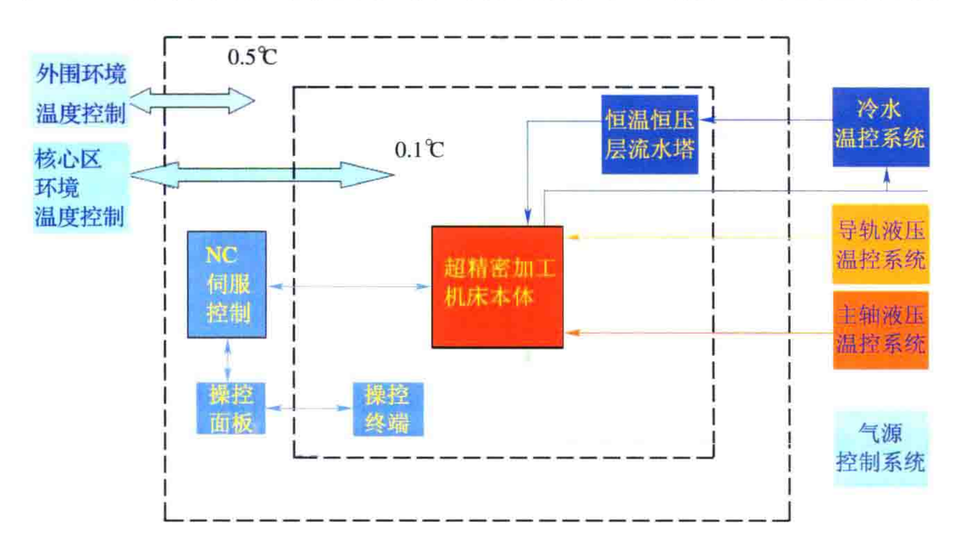


图 3－4　超精密加工机床系统总体布局

3.3.2　各部件结构特点

3.3.2.1　床身底座及隔振装置

超精密加工机床的床身是机床所有精度控制的基础，要求质量大、重心低、对温度变化的敏感度小。天然花岗岩符合这一要求，是理想的制造超精密加工机床床身的材料，特别是产于我国山东济南附近的泰山青花岗岩品质优异，是国内制造超精密加工机床床身的首选材料。铸铁也符合上述要求，大部分精密加工机床的床身使用铸铁制造，对于结构复杂的超精密加工机床床身也可选用铸铁的，或者用花岗岩和铸铁搭配使用。但铸铁床身需要经过多次人工时效或长时间自然时效彻底消除应力才能保证在以后的使用中不发生因应力释放发生的变形。

超精密加工机床一般采用隔振地基、气浮悬浮等措施隔离外界环境的振动，隔振地基设计成具有隔离环带的重力型地基，加工机床安放在三到四个主动或被动隔振气垫上，具有自动调平功能，一般要求其调平精度为 2″，隔振频率要求达到 2Hz，这样才能有效隔离外界振动对加工的影响。





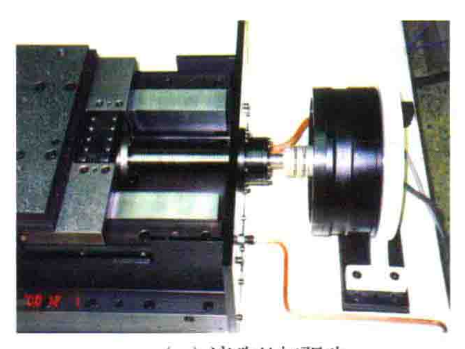
图 3－5　隔振地基及气浮隔振系统

3.3.2.2　导轨及驱动装置

从精度角度看，空气静压导轨和液体静压导轨是目前最好的高精度导轨。两者相比，空气静压导轨只需要洁净的压缩空气而不需要恒温油源，系统简单、对环境没有污染。而液体静压导轨除了承载能力和刚度大之外，最大的优势是具有良好的阻尼特性，可以有效地改善设备的动态特性，当前所有的超精密加工设备已基本采用液体静压导轨。其超精密直线导轨运动直线度可达（0.1～0.2μm）/300mm，这种导轨的加工目前还依赖于有经验的技师手工反复研磨才能达到所需的精度。此外还可以通过误差补偿技术进一步提高导轨的运动直线性。

超精密机床导轨的驱动主要有滚珠丝杠驱动、摩擦驱动以及直线电机驱动等方式。其中高精度滚珠丝杠驱动是传统的驱动方式，利用光栅进行位置闭环控制，最高也可达到 0.01μm 的定位精度。但是由于进行非球面等轮廓曲线跟踪时，滚珠丝杠的精度、丝杠与螺母的摩擦及其在运动中的微小振动都会对系统的静态特性和动态特性产生影响，所以设计安装时在电机与丝杠的连接、丝杠螺母与工作台拖板的连接方面需要增加特殊的联轴节，调试非常困难，目前这种驱动方式已经在超精密机床上逐渐被淘汰。

液体静压丝杠由于丝杠和螺母不直接接触，有一层高压膜相隔，所以没有摩擦引起的爬行和反向间隙，而且可长期保持精度，进给分辨率高。由于介质膜有均化作用，可提高进给精度，在较长的行程上可达到纳米级定位分辨率。之前由于液体静压丝杠结构复杂、加工工艺性差、价格昂贵，很少在商品化的超精密车床上应用。但是随着加工工艺水平的提高，目前市场上已经有商品化的液体静压丝杠出售，价格也有了大幅度下降。



（a）滚珠丝杠驱动



（b）直线电机驱动

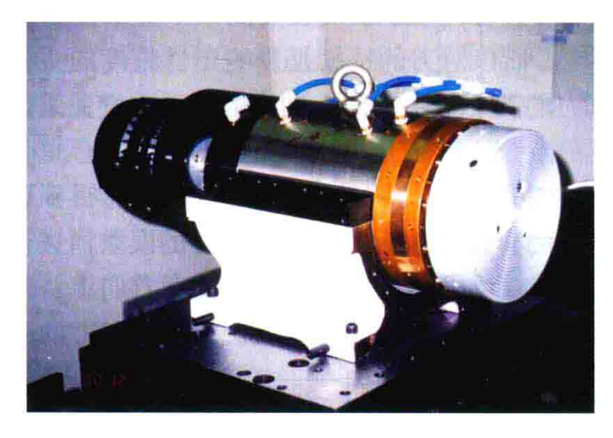
图 3-6　液体静压导轨的驱动方式

直线电机直接驱动的方式是近年来发展起来的新兴驱动技术，在使用直线电机直接驱动时，电机的动子与工作台直接相连，在电机与负载之间，不存在传动间隙和摩擦。当电机带动负载运动时，与一般滚珠丝杠副相比，直线电机显示出极高的动态刚度。由于直线电机无框架部分为非接触式部件，不存在机械传动系统的限制条件，因此，很容易达到极高或极低的运动速度。由于取消机械传动系统，速度仅受到系统中的其他部件（例如，机械零件以及来自任何反馈装置的频带宽度）的限制。

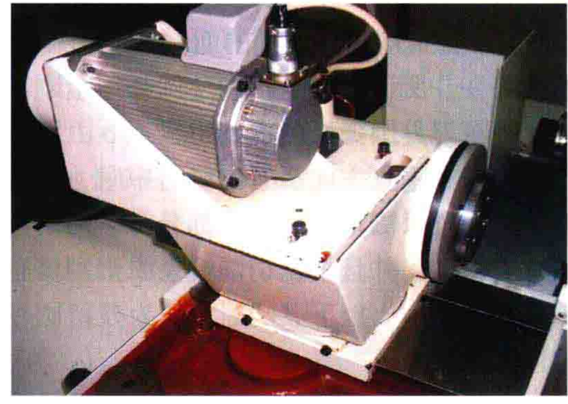
工作台的位置反馈元件的选取与其速率平稳性和定位精度密切相关。根据目前国内外位置反馈元件的性能指标和数控超精密加工机床特点，光栅尺已经成为超精密加工机床导轨位置反馈元件的标配。光栅尺从结构形式上可分为封闭式和敞开式两种，封闭式光栅尺的特点是防尘性能较好，不需要特别的防护措施，但这种结构形式的光栅尺的分辨率较低，不能满足该机床要求的低速平稳性的需要；而敞开式的光栅尺分辨率可以达到很高，如海德汉的敞开式光栅尺最高分辨率可达 1nm，索尼的开式光栅尺分辨率最高达到了 86pm。

3.3.2.3　主轴系统

目前超精密机床上的主轴均采用空气静压轴承或液体静压轴承，其回转精度均可小于 0.05μm，如图 3-7 所示。空气静压主轴是通过节流孔或多孔质材料的设计，在主轴与轴承间通以压缩空气使之形成均匀的气膜，使主轴实现无摩擦旋转。液体静压主轴的工作原理有些类似，只是将压缩空气换成液压油。由于油膜的黏滞效应，液体静压主轴的刚性、运行平稳性高于空气静压主轴，同样由于油膜的黏滞效应，液体静压主轴的旋转速度受到限制，因此需要高速旋转的主轴通常使用空气静压主轴。空气静压轴承引起主轴回转系统热变形小，但刚度较低，一般适用于高速轻载机床主轴或测量设备主轴。液体静压轴承刚度大、动态性能优越，但需要控制液压介质的温度，热变形相对较大。近年来水静压轴承在超精密机床中的运用取得成功，这种水静压轴承与油静压轴承比较，其优点是不易造成污染，另外水的黏度远低于油，因此水轴承发热较小，适合于高速运转。



（a）空气静压主轴



（b）液体静压主轴

图 3－7　超精密机床的主轴

3.3.2.4　控制系统

超精密机床数控系统的特点是高编程分辨率和高精度的伺服控制软硬件环境。在高编程分辨率条件下满足高质量切削条件，意味着需要高的控制速度，例如插补周期小于 1ms，伺服闭环采样周期小于 0.1ms。

在机刀具对刀、工件检测、系统误差测量与补偿以及多种辅助系统控制等功能常常是超精密机床系统需增加与扩充的重要功能，因此采用“多轴运动控制器 + PC”组成开放式数控系统已成为超精密数控系统的趋势。例如美国摩尔公司的 Nanopath 和 Precitech 公司的 Ultrapath 都是基于 DSP 的超精密数控系统。数控系统的硬件运动控制模块开发和运用越来越广泛，使数控系统的可靠性和可重构性得到提高。新的芯片和网络协议的发展又给数控系统提供了一种分布式网络新结构，使其可靠性和开放性更为优越。

超精密数控机床采用适当的控制算法不难实现高精度定位精度，但是当机床做非直线运动（多轴联动）时对指定轮廓曲线的控制精度（跟踪精度）还取决于机床各维运动的动态特性。采取适当的控制技术（如解耦控制技术）可以将多维运动参数加以解耦来提高跟踪精度。

多轴联动数控系统的精度主要从单个伺服轴的运动控制精度和联动轴耦合轮廓精度两方面来评价。对于单个伺服轴的运动控制，当要求的运动控制精度达到纳米级时，传统的超精密机床传动方式在低速、微动状态下表现出非线性特性，常规的运动控制策略已经很难保证伺服系统实现理想的纳米级随动精度。

多轴联动系统的轮廓精度由各伺服轴的运动误差耦合得到，耦合误差的建模及各轴相应的补偿控制量的计算都需要大量的坐标变换运算，这为实际的多轴联动耦合控制器的设计带来了很大的不便。智能控制理论与方法将可能为此提供理想的解决方案。此外要实现多轴联动纳米级轮廓控制精度，同步问题是一个不可忽略的问题，同步精度直接影响到系统的轮廓跟踪精度。

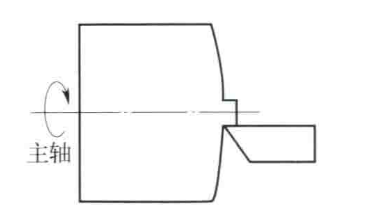
3.3.2.5　对刀系统

（1）刀具调整误差来源

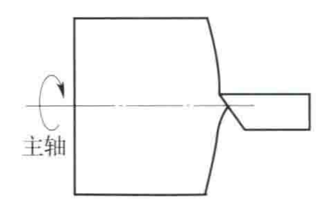
超精密车削加工中，当使用圆弧刃金刚石刀具通过 CNC 程序进行球面或非球面加工

时，刀具高度（Y）和水平（X）方向上的对刀误差 Δy、Δx 以及刀尖曲率半径的测量误差 ΔR 将会直接影响工件的面形精度和尺寸精度。所以对刀的精度是影响工件精度的主要因素之一。所谓对刀是指确定圆弧刃金刚石车刀的圆心与主轴回转轴线的相对位置关系以及金刚石刀具圆弧刃的准确半径。

当刀具垂直方向没有准确对中时，就会存在 Y 轴方向的调整误差 ΔY。为了能得到该误差值，可以测量工件中心部分产生的切削残余的直径，然后，根据所测得的误差值进行相应的调整，并且根据切削残余来辨别修正的方向。如图 3－8 所示，在垂直方向上，当车刀在工件中心以下 $d/2$ 时（d 为残留圆柱或圆锥的直径），$\Delta Y = -d/2$，由于车刀的前角近似于 0°，所以未加工部分的形状为圆柱形。同样，当车刀在工件中心以上 $d/2$ 时，$\Delta Y = d/2$，由于未加工部分被后刀面切削，通常后角超过 0°，所以残留部分的形状成为圆锥形。因此，通过观察切削残留部分的形状和大小，既可以得到补偿的方向，又可以得到补偿值的大小。



（a）$\Delta y > 0$圆柱残余（车刀过低）



（b）$\Delta y > 0$圆锥残余（车刀过高）

图 3－8　刀具高度方向（Y）误差的影响

在机床回转的径向（X 轴）方向上存在车刀调整误差 ΔX 时，工件的实际加工面形与理论曲面会发生偏离从而产生加工误差，图 3－9 所示。假定工件切削点的倾角为 θ 时，Z 轴方向的误差曲线 E_{Δ} 可以近似的由式（3－1）表示

$$E_{\Delta x}(\theta) = -\Delta X \cdot \tan\theta \tag{3-1}$$

圆弧刃金刚石车刀的曲率半径 R 存在误差 ΔR 时，如图 3－10 所示，也会对工件的加工精度造成影响。假定工件切削点的倾角为 θ 时，其 Z 轴方向的误差曲线 $E_{\Delta R}$（θ）可近似由式（3－2）表示

$$E_{\Delta R}(\theta) = -\Delta R(1/\cos\theta - 1) \tag{3-2}$$

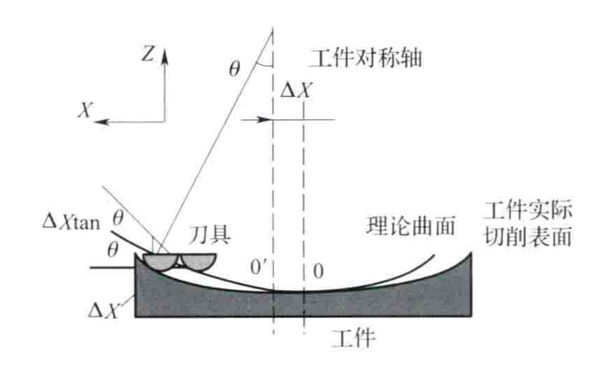


图 3－9　水平方向（X）刀具调整误差对工件形状的影响

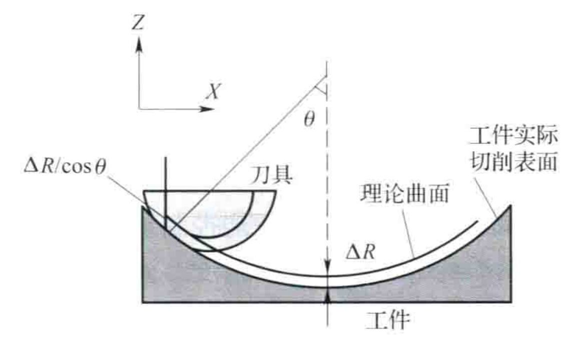
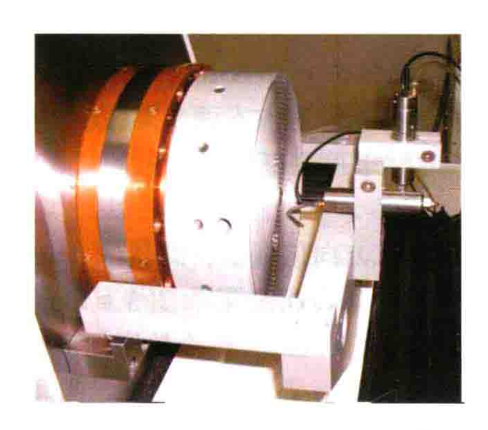


图 3－10　刀具半径误差对工件形状的影响

（2）基于LVDT的在机对刀仪的对刀

以卧式超精密切削加工机床为例简单介绍利用在机对刀仪进行初始对刀。正如前面所述需要在刀具进给水平 X 方向和刀具高度垂直 Y 方向进行对刀，所以对刀仪中安装水平和垂直方向共两个传感器，并采用三个定位小球运用6点定位的方法安装在机床回转主轴座上可保证重复定位精度达到 $2\mu m$，并可以方便地拆卸。测头一般采用气浮电感测头，具有摩擦力小、分辨率高、测力小、非线性好、输出灵敏度高等优点。可以通过其他方法进行对刀仪的零位标定，即确定两个测头圆心在机床坐标系中的位置。



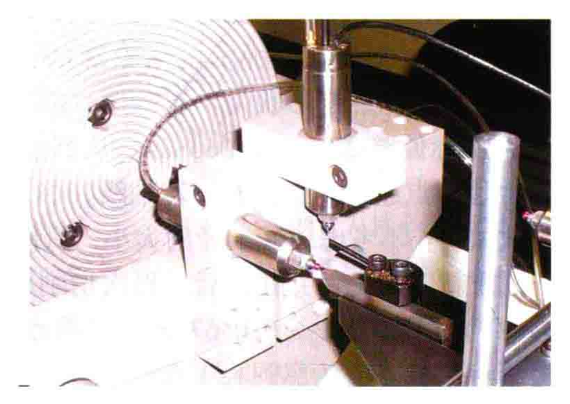


图3-11　在机对刀仪

传感器零位标定完成后，打开应用程序进入对刀功能，首先进行刀具高度（Y）方向对刀，然后再进行刀具进给水平（X）方向对刀。

①高度方向对刀时，将测头置于刀尖上方并与之接触，调节刀尖高度（通过刀座微调系统），当刀尖到达传感器的零位时，系统发出信号，高度方向对刀结束。

②水平方向对刀时，由于测头和刀尖都是圆弧面，接触后它们的圆弧圆心会在 X 向产生偏差量 Δx（如图3-12所示），所以水平对刀需要进行 Δx 的补偿。先用测头在刀尖圆弧上测得一点 M_1（X_1，Z_1），系统接下来会自动测得圆弧上另外两点 M_2（X_2，Z_2）和 M_3（X_3，Z_3）。根据这三点坐标，运用三点法可以求出两圆心间的偏差值 Δx 和刀具半径 R。然后，程序会根据偏差量的大小自动调整刀尖位置，从而完成 X 向对刀工作和刀具半径 R 的测量。

（3）试切对刀件精确对刀

由于LVDT在机对刀装置的测量精度不高，尤其是水平（X）方向对刀和刀尖半径 R 的测量误差一般在0.01mm左右，同时由于LVDT测头与金刚石刀具接触可能会对刀具的切削刃和前后刀面产生损伤，因此不能满足超精密加工工件面形精度和尺寸精度的技术要求，最多只能作为初步对刀，要实现精确对刀还需要采用试切小直径球面对刀件的方法，以减小对刀误差对加工精度的影响。一般采用轮廓仪对对刀试切工件面形精

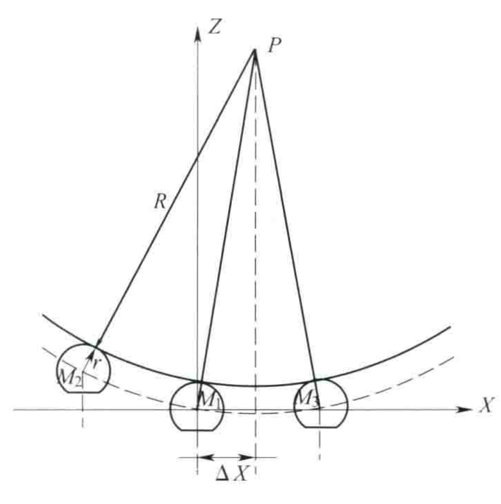


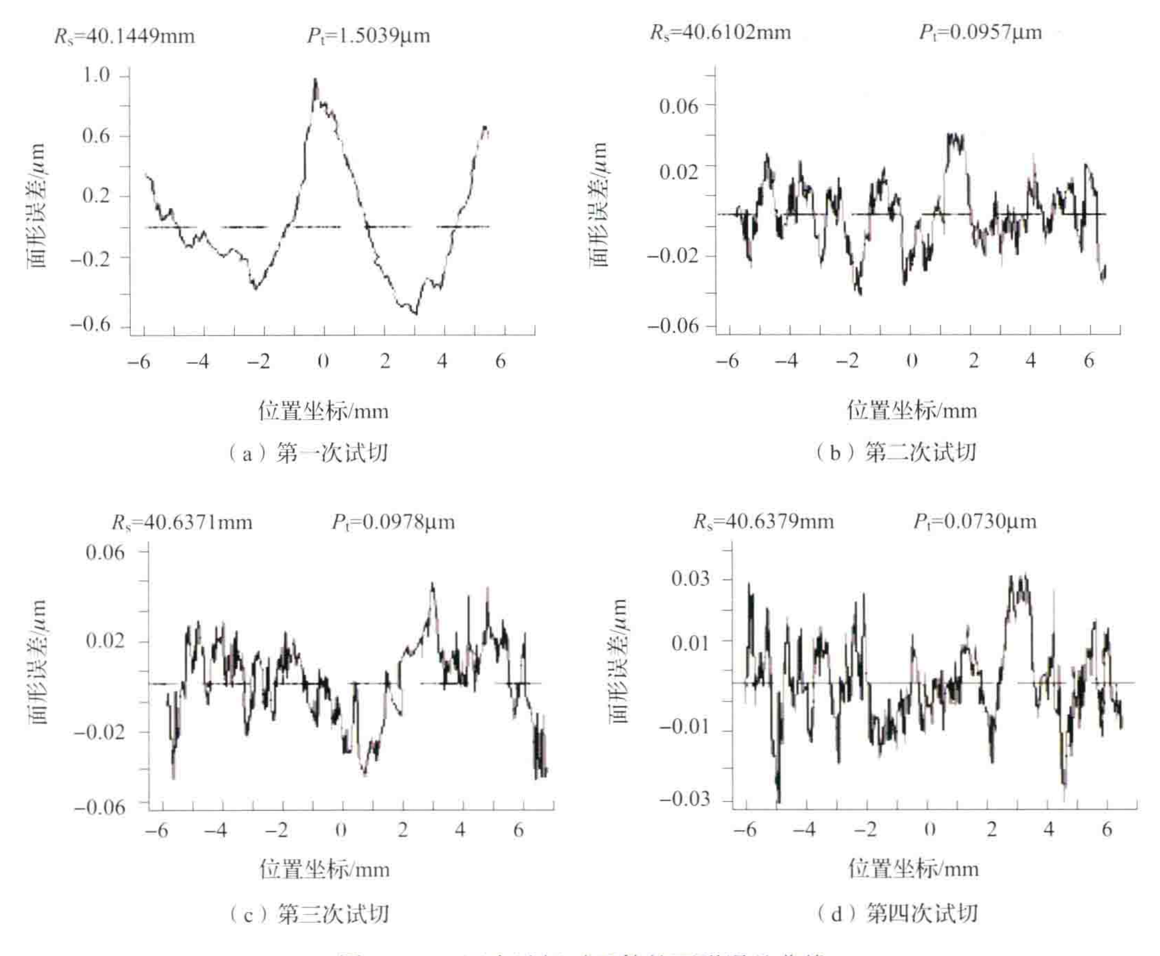
图3-12　自动对刀原理示意图

度和尺寸精度进行检测。它具有大的量程和极高的分辨率，可实现球面和非球面零件面形精度和尺寸精度的测量与分析，根据测量的面形精度和误差形状，为超精密车削过程中的精确对刀提供依据。

下面举一个实际试切对刀件精确对刀例子：球面对刀件的直径为 12mm，顶部为 $R_{s0}=40.64$mm 的凸球冠，材料纯铝，要求控制球面面形精度 $P_t \leqslant 0.15\mu$m，球冠半径控制在 40.640 ± 0.003mm 以内。

第一次试切：首先试切并找正工件外圆径向跳动在 1μm 以内，这也将作为之后重新装夹后的找正基准。运行切削程序切削工件，完成切削后取下工件在轮廓仪上测量，测量分析结果如图 3-13（a）所示。全轮廓的面形误差 $P_t=1.5039\mu$m，工件球径 $R_s=40.1449$mm，整个轮廓的形状为“W”形。进一步分别分析轮廓左右两半圆弧，得到左右轮廓圆心 X 坐标偏差 $\Delta x=-0.066$mm。从测量分析的结果可判断：工件过切，即加工中刀具与工件切削点超过了工件的回转轴线。

第二次试切：不考虑球冠半径的大小，只修改刀具的 X 向偏置值，即 $\Delta x_{offset}=\Delta x/2=0.033$mm。重新安装工件并找正后，再次切削对刀件，测量分析结果如图 3-13（b）所示，全轮廓的面形误差 $P_t=0.0957\mu$m，工件球径 $R_s=40.6102$mm，整个轮廓的形状均匀。进一步分析可得到左右轮廓圆心 X 坐标偏差 $\Delta x=-0.001$mm。从测量分析的结果可判断：工件面形精度满足要求，但球冠实际加工半径小于理论半径值。



（a）第一次试切　（b）第二次试切　（c）第三次试切　（d）第四次试切

图 3-13　四次试切对刀件的面形误差曲线

第三次试切：第二次试切后测试的结果表明实际球冠加工半径小于理论半径，所以在程序中可增大刀具半径补偿值，但是在程序调用刀具半径补偿指令的过程中，整个轨迹的圆心位置也将发生变化，如图 3－14 所示。图中细实线 ABC 表示增大刀具半径前切出的轮廓，粗实线 EFG 表示增大刀具半径后切出的轮廓，O_1 为 ABC 圆弧中心，O_2 为 EFG 圆弧中心，Δr 为半径补偿修改量。从图中可以看出在点 G 处，工件过切且过切量等于 Δr。因此，在增大刀尖半径补偿的同时，需要相应地增大 X 向偏置值。本例中增大刀尖半径补偿 $\Delta r = 0.03\text{mm}$，所以同时也增大 X 向偏置值 $\Delta x_{\text{offset}} = 0.03\text{mm}$。安装工件并找正后重新切削对刀件，测量分析面形结果如图 3－13（c）所示，全轮廓的面形误差 $P_t = 0.0978\mu\text{m}$，工件球径 $R_s = 40.6371\mu\text{m}$，整个轮廓的形状为“M”形。进一步分析得到左右轮廓圆心 X 坐标偏差 $\Delta x = 0.003\text{mm}$。从测量分析的结果可判断：工件略微欠切。

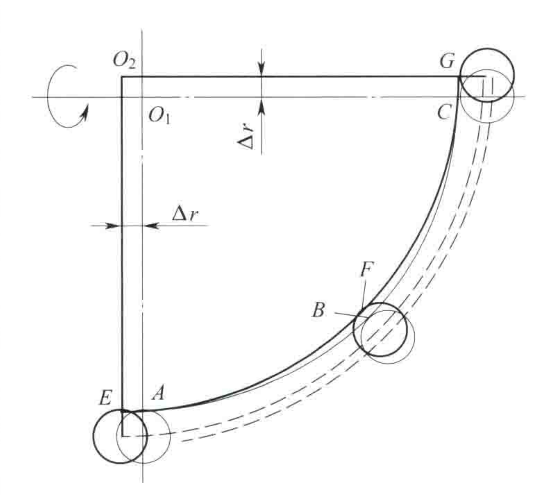


图 3－14　增大刀具半径前后刀尖圆弧中心运动轨迹

第四次试切：仅减小 X 向偏置值 0.0015mm。安装工件并找正后，重新切削对刀件，测量工件结果如图 3－13（d）所示，全轮廓的面形误差 $P_t = 0.0730\mu\text{m}$，工件球径 $R_s = 40.6379\mu\text{m}$。从测量分析的结果可判断：工件面形精度以及球冠半径均满足要求。

通过以上四次的试切，最终完成了刀具的精确对刀。

3.3.2.6　其他附属装置

超精密切削加工设备中其他辅助装置在设备中也起到了重要的作用，主要包括刀架及吸屑装置、喷雾冷却装置、恒温洁净油源及气源、恒温洁净环境等。

刀架设计中应考虑到其刚性和可调节性，应具有刀尖高度微调功能用于精密对刀。采用平行四边形铰链微调机构和杠杆机构的设计，如图 3－15 所示。吸屑机构依靠机床供气系统气压，利用文丘里原理产生真空或者利用工业吸尘器，收集切屑。

当使用金刚石车刀车削工件时，为达到最佳的切削条件与最小的刀具磨损，采用了喷雾装置以实现工件、刀具的冷却、润滑，进而改善工件的表面加工质量。喷雾作用的实现是使用供气系统的压缩空气将切削液转化为微细的喷雾。冷却液的成分及组成比例对加工质量影响较大，不同的工件选择不同的冷却液。

为保证液体静压导轨运动副和主轴运动副的特性稳定，需要对液压系统的流体工作介质进行恒温控制，其控制精度为 20±0.1℃。压缩空气需要经过冷凝、过滤等，见图 3－16。

整个系统置于超净间，其温度和湿度都有严格控制。温度控制精度一般要求为 20±1℃。


图 3－15　超精密车床用微调刀架

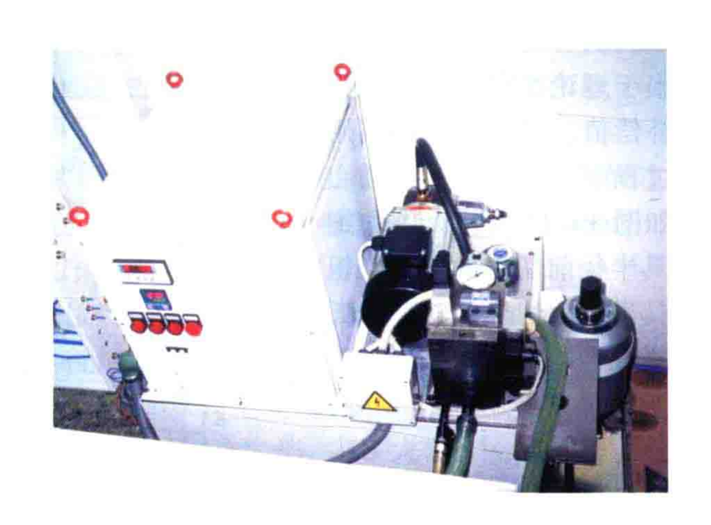


图 3 - 16　超精密机床液压及气动系统

3.4　模辊超精密加工机床

微结构功能表面具有特定的拓扑形状，结构尺寸一般为 10 ~ 100μm，面形精度小于 0.1μm，其表面微结构具有纹理结构规则、高深宽比、几何特性确定等特点，可以传递材料的物理、化学和光学特性。因此，微结构功能表面在光学系统、显示设备、聚光光伏产业、交通标志标牌、照明等领域被广泛应用，市场需求量巨大。为满足上述领域对大尺寸面积的微结构功能表面的低成本、高效率、高精度地制造的需求，Roll - to - Roll 复制加工技术是一种最具前景的工艺方法。而 Roll - to - Roll 生产工艺中最为关键的技术就是模辊的加工，超精密金刚石车削技术是加工此类模辊的重要手段，因此，大尺寸微结构模辊超精密加工机床的研制就成为 Roll - to - Roll 生产工艺中最为关键的一个环节。

3.4.1　国外模辊超精密加工机床结构特点

（1）美国摩尔公司 Nanotech HDL2000/HD2000 - HD 卧式数控超精密模辊机床

该机床采用天然花岗岩作为床身，保证了良好的热稳定性和隔振特性，如图 3 - 17 所示；头架主轴（*C* 轴）和尾架主轴采用的是大载荷的液体静压轴承；直线轴采用直线电机驱动、液体静压导轨支撑技术，具有良好的平滑性、刚度和阻尼特性；该机床可加工的模辊零件尺寸最大为：直径 500mm，长度为 2000mm，重量[①]为 1800kg；数控系统的编程分辨率可以到达 1.0nm；具有自调平隔振系统，使得加工过程中的振动降到最小。同时，该机床还提供了丰富的可选附件，包括回转 *B* 轴、快速伺服刀架、光学对刀系统、恒温风淋控制系统、温度监控系统和纳米级精度的双面动平衡系统等。

（2）美国 Precitech 公司 Nanoform Drum Roll lathe1400 超精密模辊机床

该设备采用卧式结构，头架和尾架采用液体静压主轴双端支撑，布局结构如图 3 - 18 所示；*Z* 轴导轨行程为 1480mm（该轴方向与模辊零件轴线平行），*X* 轴行程为 250mm；

① 本书的重量实为质量（mass）的概念。



图 3-17 美国摩尔公司的 Nanotech HDL2000/HD2000-HD

可以加工的工件重量为 1640kg；该机床的主轴径向回转精度小于 0.2μm，Z 轴水平直线度小于 1.0μm（任意 450mm 行程内），X 轴水平直线度全行程内低于 0.5μm。

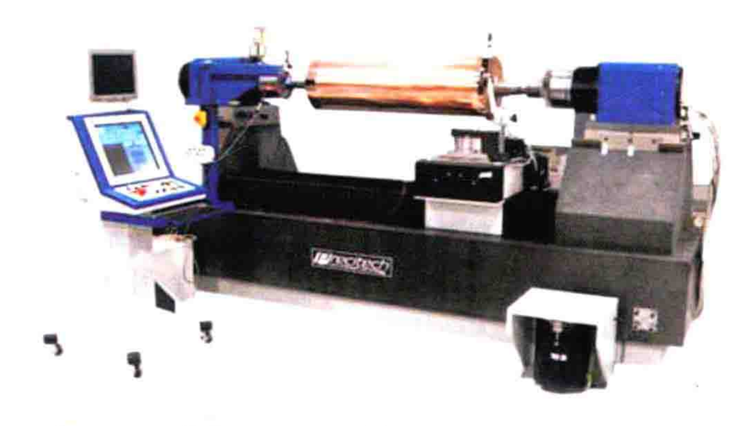


图 3-18 美国 Precitech 公司 Nanoform Drum Roll lathe1400

（3）英国克兰菲尔德大学 ECOR1664 系统模辊切削机床

机床总体布局如图 3-19 所示，该机床与上述设备采用了不同的布局形式，主要体现在导轨和溜板的布局上。

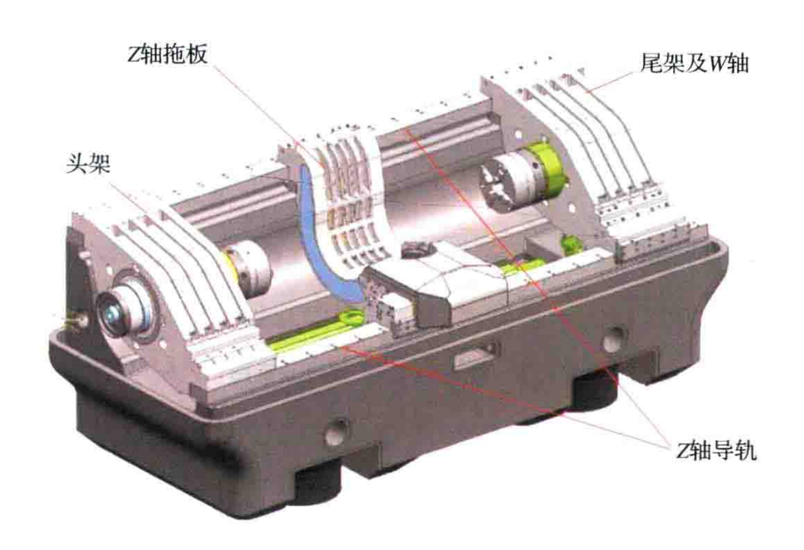
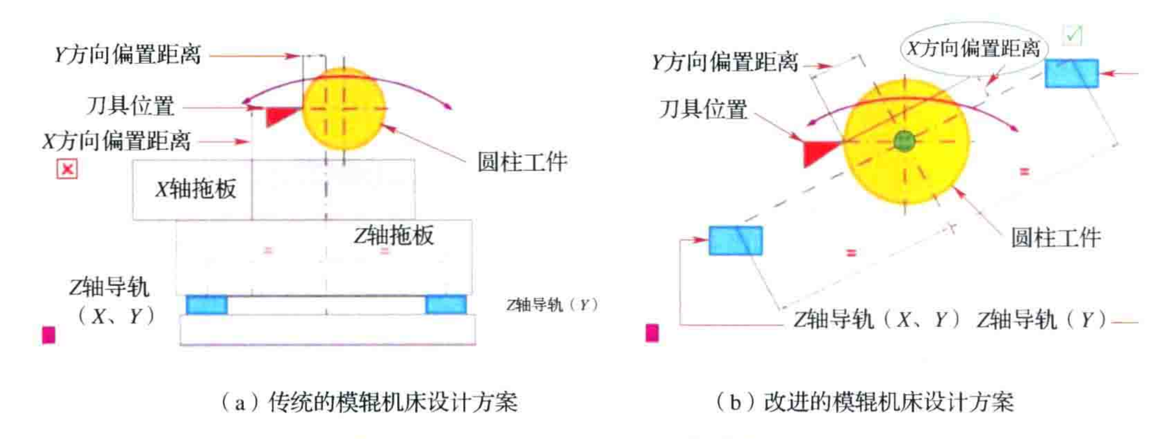


图 3-19 克兰菲尔德大学 ECOR1664 模辊切削机床

传统的模辊超精密机床的直线轴 X 轴和 Z 轴如图 3－20（a）所示，支撑位置较低，机床变形、振动等因素对刀尖与模辊之间距离有显著影响；而采用改进的布局结构，如图 3－20（b）所示，提高了支撑位置，偏移量会大大降低，从而减小了切削区域对机床变形、振动的敏感性，降低了机床几何误差，提高了切削稳定性。德国库格勒公司的 Drum Lathe TDM 系列机床导轨也采用相类似的斜体式布局。



（a）传统的模辊机床设计方案　　（b）改进的模辊机床设计方案

图 3－20　模辊超精密机床的两种设计方案

（4）日本、韩国

目前，受国家政策的鼓励和市场利润的驱使，日本和韩国也都开展了模辊超精密机床的研究工作。日本日立公司横滨研究中心的学者在模辊机床上利用压电陶瓷驱动的快速伺服刀架加工出微透镜阵列。图 3－21 为微切削运动控制系统原理图，为了实现同步控制，工件轴工作在恒定转速下，快速伺服刀架实时读取工件轴的转角信息来调节伺服刀架的位置，主轴的转角信号作为了刀具进给的幅值和频率的函数。在长为 390mm、直径为 130mm 的模辊上加工了 13 亿个微透镜阵列，单个透镜的最大直径为 16μm，切深为 1μm，切削时间为 165h。

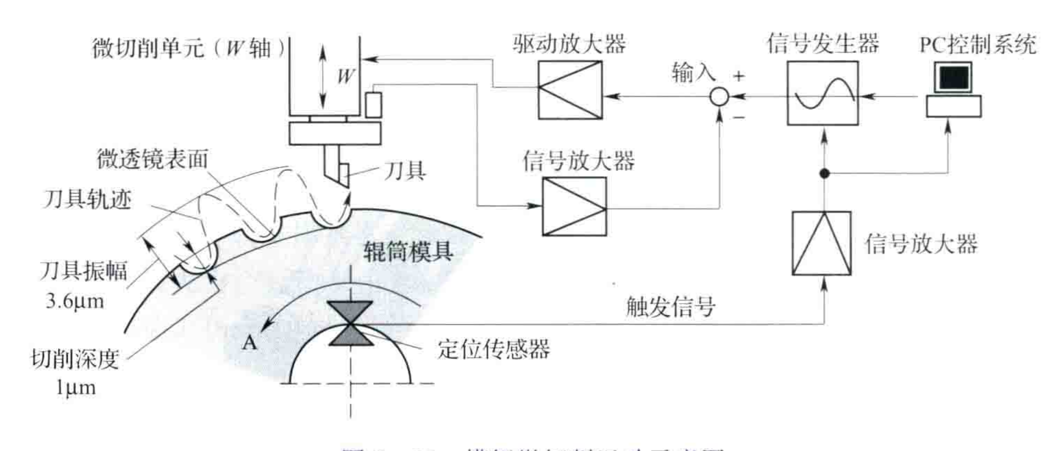


图 3－21　模辊微切削运动示意图

日本东芝公司 ULR 系列高精度模辊车床总体布局如图 3－22 所示，能够在模辊表面加工出复杂的三维微结构，其 X 轴和 Z 轴使用线性马达，增强了伺服刚度，降低了不规则进给和象限投射，实现了平滑进给。X 和 Z 导轨均采用滚柱型导轨，精选的辗柱在高精度研磨的 $V-V$ 表面上进行对准，实现了平滑和高精密运动以及高刚度。高轴马

达与同步内置伺服马达相集成，并使用高精度编码器。因此，当主轴用作分度轴（C轴）时，消除了机械端隙，可执行高精度分度和定位。其中，ULR－628B（H）机床采用的是FANUC系列30i－B数控系统，可加工辊的最小直径为180mm，最大直径为600mm，最大可加工长度为2800mm，吸盘之间的最大重量为1000kg，X轴和Z轴的最大进给速度分别为5m/min和15m/min，编程分辨率为0.01nm，B轴和C轴的角度分辨率为0.00001°。

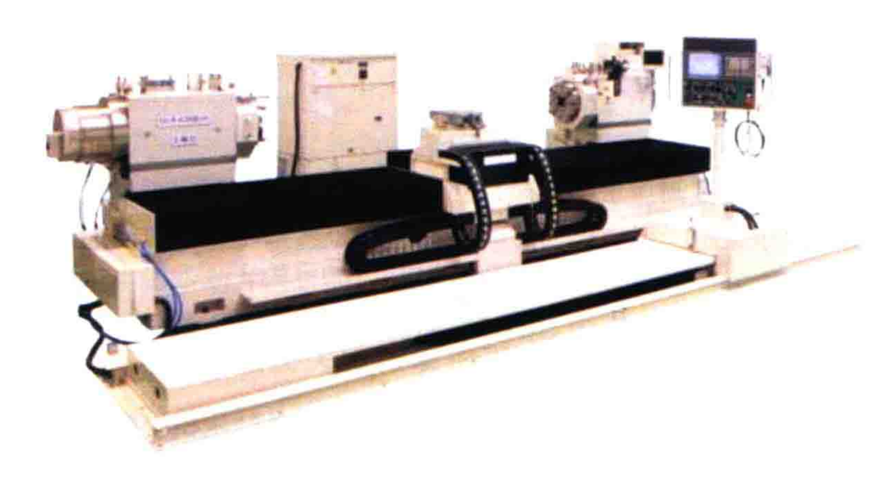
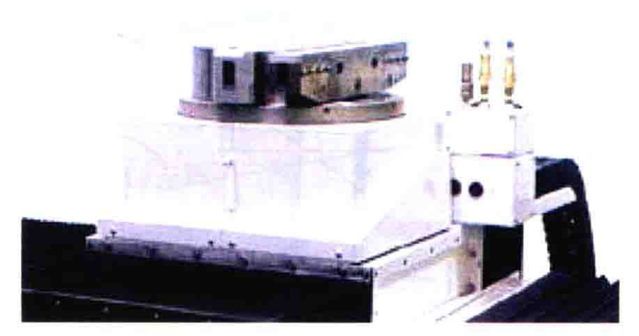


图3－22 东芝机械公司的ULR系列高精度模辊车床

主轴（C轴）采用高精度静液压轴承，如图3－23（a）所示，以使主轴支持轧辊，实现高旋转精度，同时，采用高精度温度控制器控制静液压油的温度，以稳定轴承。如图3－23（b）所示，刀架上的B轴采用高精度液压轴承，并采用和主轴相同的方式使用同步内置伺服马达和高精度编码器，确保高精度定位。



（a）主轴（C轴）外形图



（b）刀架上的B轴外形图

图3－23 ULR系列高精度模辊车床部件结构示意图

韩国某研究所设计与开发了卧式模辊超精密切削机床，可切削的模辊最大尺寸为直径600mm、长度为2500mm。该机床包括两个回转轴C轴和B轴，两个直线轴X轴和Z轴，结构示意图可见图3－24，主轴/C轴采用的是大载荷、高刚度的液体静压轴承，直线轴采用的是直线电机驱动。尤其是针对大行程的Z轴，为了保证在加工金字塔阵列时，该轴在连续、快速进给运动的同时直线电机发热量较低，Z轴采用了双直线电机驱动，响应速度快同时温升低。

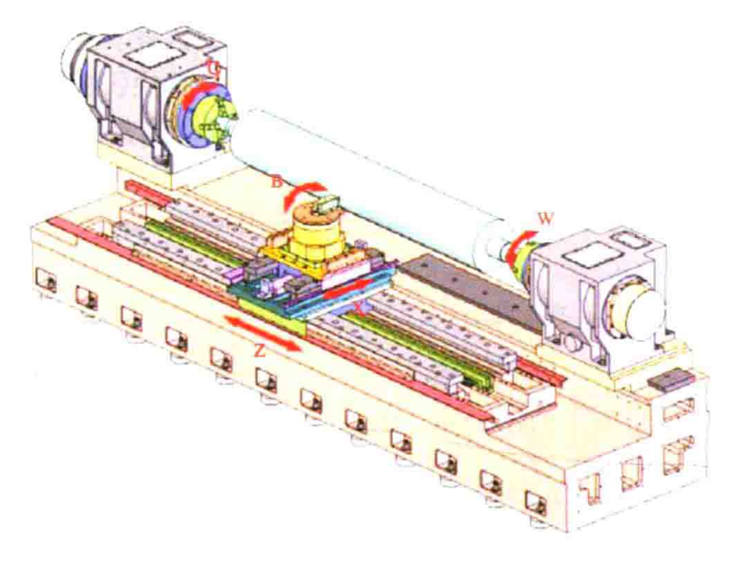


图 3-24 模辊超精密机床结构示意图

3.4.2 大尺寸微结构模辊超精密加工机床研制关键部件

大尺寸微结构模辊超精密加工机床主要用于各种复杂微结构模辊的超精密加工，这就要求机床不仅需要有超精密和高刚度的各类运动部件，还要有高频响、高精度、高刚度的驱动及控制系统，从 3.4.1 节国外设备的特点来看，机床的总体设计方案宜选用卧式结构；同时由于微结构特征工件尺寸大、加工时间长、精度高，对设备所处的温度、振动等环境要求也非常严格，设备总体布局如图 3-25 所示。

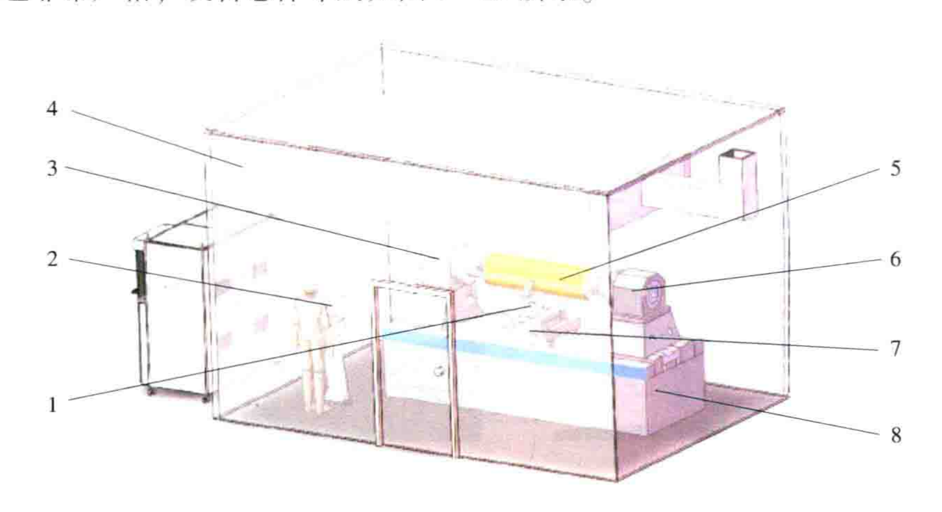


图 3-25 大尺寸微结构模辊超精密加工机床整体布局

1—*B* 轴及刀架；2—操作控制柜；3—头架主轴；4—环境控制系统；
5—模辊工件；6—尾架主轴；7—纵向及横向拖板；8—机床底座

模辊超精密加工机床的基本部件主要包括：(1) 床身；(2) 液体静压导轨；(3) *B* 轴；(4) *C* 轴工件主轴及尾架；(5) 夹盘及顶尖；(6) 具有标准化的机械及电气接口的快速刀具伺服系统。该机床的 *X*、*Z* 轴为直线运动轴系，*C* 轴为具有精确角运动控制功能的工件主轴，*B* 轴为可连续回转的气体静压伺服回转轴，设备可实现 *X*-*Z*-*B*-*C* 四轴联动。其中超精密液压导轨及超精密 *B* 轴在前面已有论述，在此不再赘述。

3.4.2.1 机床头架、尾架超精密主轴

工件主轴系统是整个面向微结构模辊加工的数控超精密机床的核心部件之一，它的回转精度、刚度直接影响到机床的加工精度。超精密加工机床主轴通常采用液体或者是气体静压轴承支撑。气体静压主轴具有回转精度高的优点，同时，适合高速回转运动，且制造相对容易。液体静压轴承同样具有回转精度高的优点，而且液体静压轴承的承载及刚度一般要高于气体静压轴承。根据本机床的具体情况，加工模辊零件的尺寸较大、重量较大，而转速相对较低，一般宜采用液体静压轴承结构。但是由于模辊的加工时间长，主轴的发热成为影响辊筒微结构加工精度的主要因素之一，所以必须严格控制液压系统供油的温度。还有一种方案是头架及尾架主轴采用空气静压轴承，这样就可以避免热变形的影响，但必须要提高空气静压轴承的承载能力和刚度，由于模辊工件通过头架、尾架共同支撑，一定程度上降低了对主轴系统刚度的要求，所以该方案也能满足加工设备的总体要求。

由于此类机床的加工模辊重量重、体积大，工件与头架、尾架形成一个大惯量的转动系统，如果只采用头架驱动并由辊筒工件拖动尾架的方式可能导致主轴工件系统与电机的惯量比严重不匹配，并且由于细长轴辊筒的扭转刚度弱，因此在角位移伺服控制时，容易产生振荡，从而影响微特征的加工精度，如图3－26所示。所以对于此类大型机床一般可考虑采用头尾架主轴双动力同步驱动结构，驱动系统可选用直流无刷力矩电机，同时安装有高精度的位置反馈元件，可以实现高精度的位置控制。这套系统可靠性高，同时具有很宽的调速范围，可以很好地满足此类机床的各种加工对象的工艺要求。

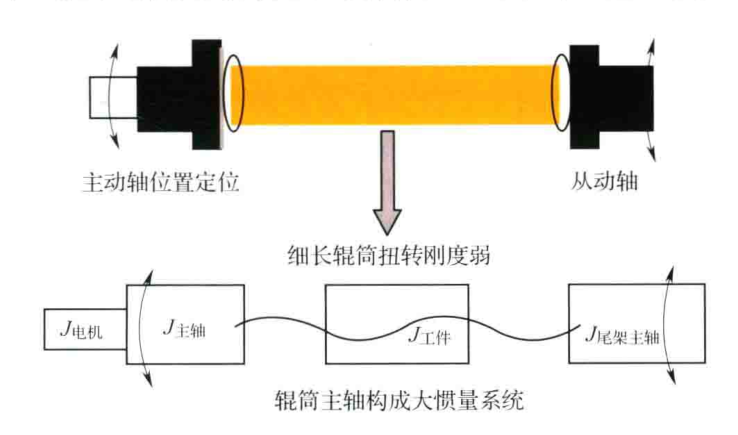


图3－26 大惯量系统头架单驱时系统的扭转特性

3.4.2.2 模辊超精密机床数控系统设计

设备的数控系统主要是由计算机和多轴运动控制卡来构成的一个开放式的数控体系，如图3－27所示。其中，基于DSP的多轴运动控制卡主要用于伺服运算和反馈控制，刀具补偿、插补运算（直线、圆弧、样条曲线、螺旋线）、曲线轨迹计算、螺距补偿等对实时性要求较高的工作，而计算机处理系统级的任务，如通信控制、图形显示、动态仿真、数控编程等则通过CNC计算机系统来完成。

微细超精密切削加工对运动控制系统的要求不仅仅体现在运动控制精度的要求，还对系统的工作带宽、刚度匹配、几何精度补偿、机械谐振抑制等有极高的要求，常规的基于PID控制算法的控制器结构已经很难满足超精密微细加工的系统要求。因此，设备的运动控制器在积分分离PID算法的基础上，采用速度和加速度前馈来拓展系统带宽，集成陷波

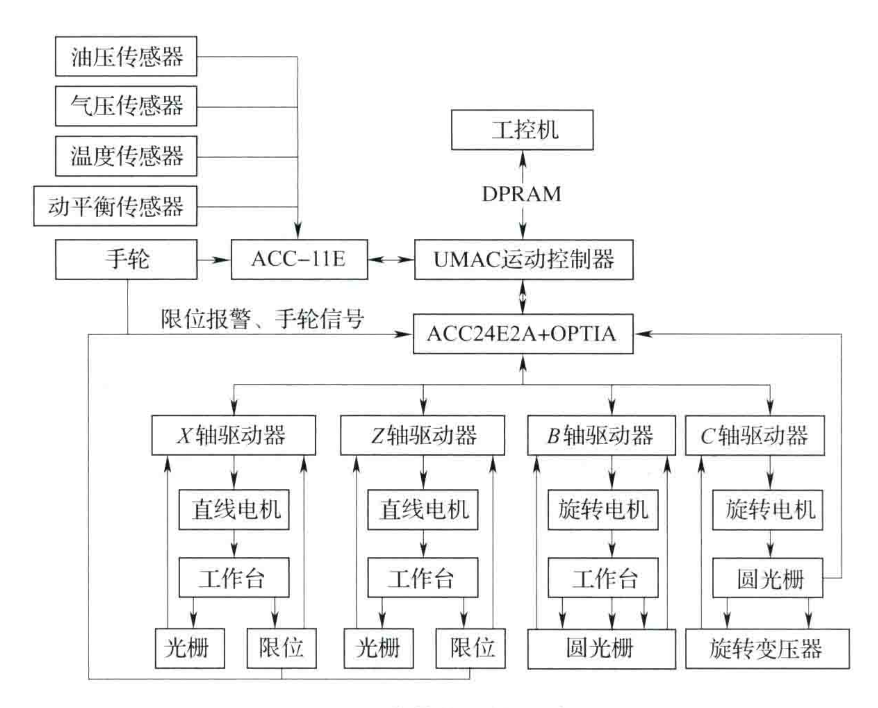


图 3－27　机床数控系统设计原理图

滤波器来抑制系统的机电谐振，并采用补偿表来实现机床几何精度的样条插值及补偿，其结构示意图见图 3－28。

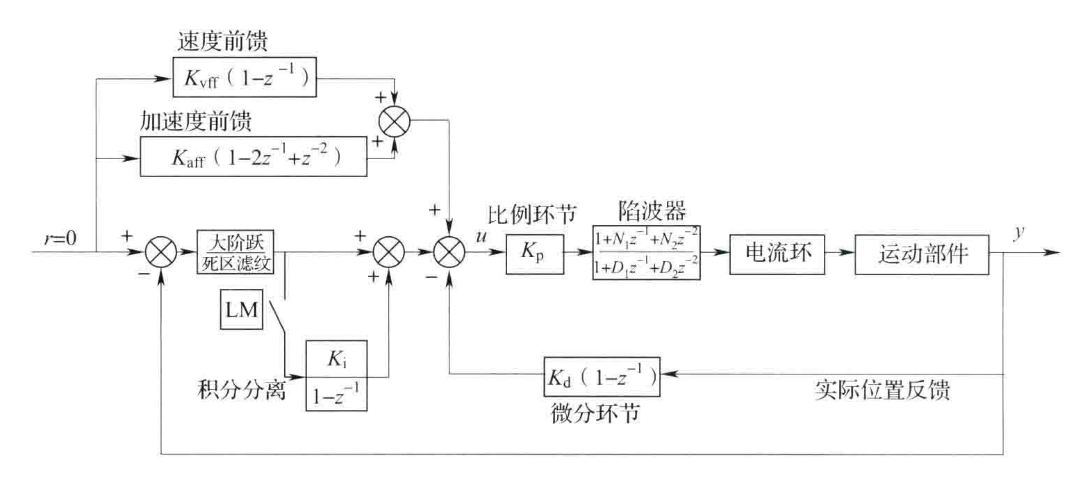


图 3－28　位置环复合控制算法

3.4.2.3　模辊超精密机床加工过程监测技术

模辊超精密切削加工过程监测技术的应用可大大延长金刚石刀具使用寿命、保证机床的精度、保证产品质量、提高生产效率、保证设备及人员安全。其中的关键技术主要包括基于监控参数的在线监测技术，多传感信息融合检测技术，机床功能部件的检测技术，加工中工件状态的测试技术等。

（1）模辊表面微结构特征精度及表面质量的在位检测

模辊零件上加工的微结构的表面质量及面形精度直接决定了产品的性能，因此通过对辊筒上微结构表面形貌进行在位测量及监测，可以保证最终的产品质量。此外由于一根复杂微结构的模辊加工周期长，在整个加工过程中由于设备或环境等不可预测的条件发生改

变可能会影响工件的加工效果，在线监测系统通过对加工工件上加工特征的实时检测及时发现问题，从而可及时终止加工，避免后续无效加工。如美国 Precitech 公司将卧式模辊机床与英国泰勒·霍布森研发的 Form Talysurf 系列 PGI 型轮廓仪进行集成，实现微观形貌的在位测量。





图 3 - 29 Precitech 公司的超精密卧式模辊机床在位检测

在位检测系统一般采用非接触方式进行微结构特征的表面形貌测量，这样不会损伤被加工表面，同时检测效率高。白光干涉是一种非接触式的表面形貌测量方法，一束白光经过干涉物镜后，一半的光束从参考镜返回，另一部分光透过物镜到达物体表面，其反射光与参考光发生干涉，在 CCD 成像面上形成干涉条纹。由于白光是由一系列不同波长的光组成，同调性低，会形成低周期的干涉波，且只有零相位点光强最大，物体表面的高低起伏将会影响零相位点的高度，通过图像采集每一个像素点的光强进而可以计算出表面高度。白光干涉仪结构简单，垂直扫描范围达到 400μm，垂直位移分辨率为亚纳米级，非常适用于光学微结构表面的形貌检测，如图 3 - 30 所示。

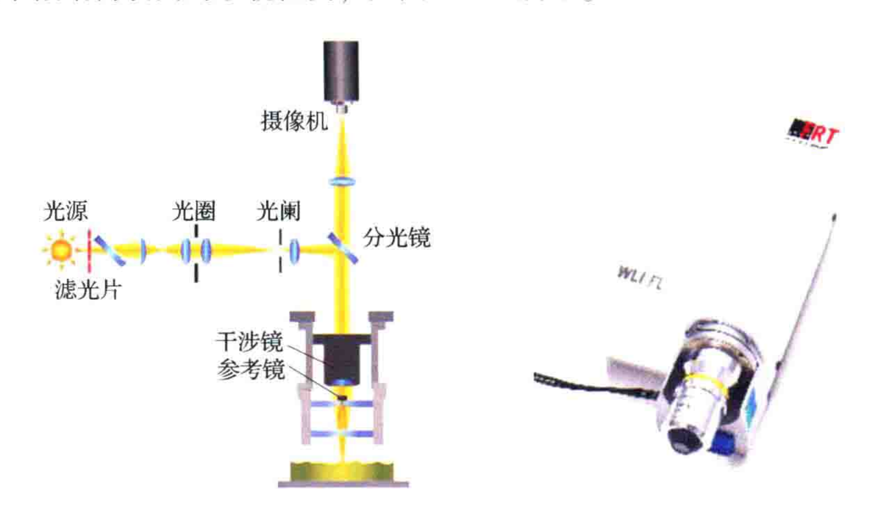


图 3 - 30 白光干涉仪测量原理及实物图

应用白光干涉的原理在线测量光学微结构的示意图如图 3 - 31 所示，白光干涉探头与刀具和 CCD 测头安装在机床的 B 轴上，可用于加工工件表面的监测和测量。

（2）头尾架主轴状态监控

对模辊加工机床头尾架主轴等部件的运行状态实施实时监测，可以保证加工设备在加工过程中的精度，提高设备运行的可靠性。

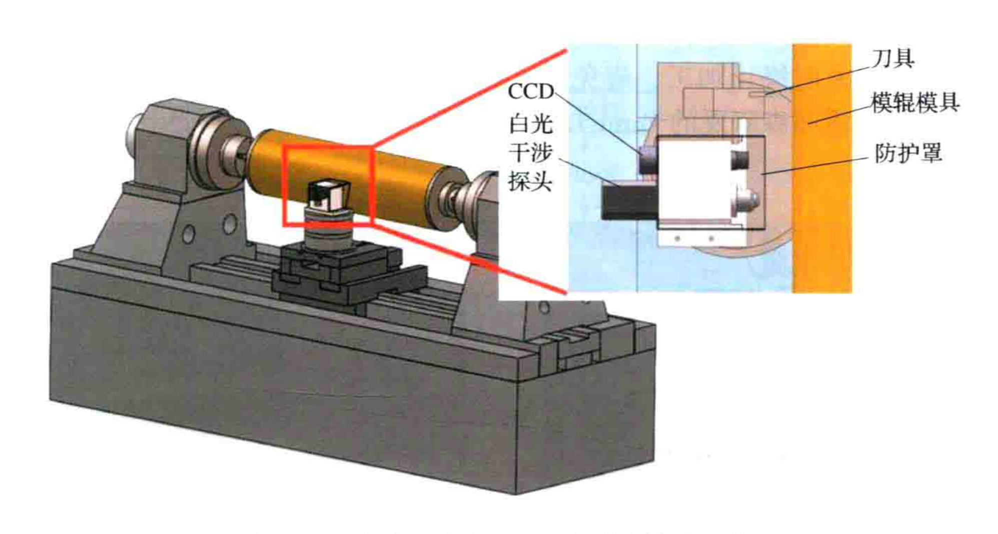


图 3－31　白光干涉在线测量光学微结构示意图

主轴状态监测电容式传感器是将被测量转化为电容变化量的装置。由物理学原理可知，电容由两个平行电极板、中间电介质组成；其电容量由极板间隙、极板面积、电介质介电常数决定。电容传感器可以分为极距变化型、面积变化型、介质变化型。在实际中，极距变化型应用十分广泛。如果两基板正对面积不变、电介质介电常数一定，则电容量 C 与极距成一定函数关系，极距变化可以由电容量变化测得，实现物理量到电量的转变。极距变化型电容传感器可实现动态非接触式测量，具有灵敏度高、适于微小位移、对被测系统影响小的优点，可以用来实现对于主轴运行状态的实时监测。

采用三点法可对主轴回转精度进行测量，三点法一般采用离散采样方式。原始数据包括主轴轮廓度误差与主轴回转误差，可以进行分离计算，同时得到两项误差值。如图 3－32 所示，同一平面布置三个电容传感器。A、B、C 三个传感器安装在同一测量平面内，A、C 对称分布，B 位于中心上方。由传感器输出信号，测得 A、B、C 处的间隙值，通过解算即可求得主轴中心的偏差量。

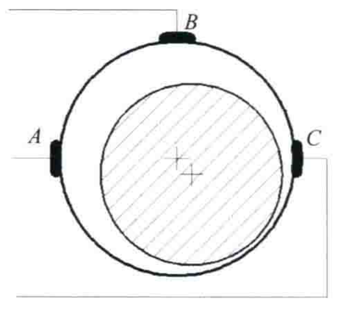


图 3－32　三点法测主轴回转误差原理

如图 3－33 所示，在两个平面内分别布置三个传感器，测得轴心的偏心误差。综合两处偏心量，即可得出轴线的摆动误差。这样通过在头架或尾架两侧配置两组电容传感器，可以实时对主轴的回转误差和轴线摆动误差进行监测。

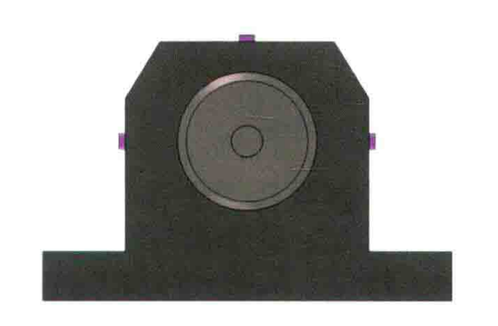




图 3－33　主轴传感器布置图

（3）金刚石切削刀具的在线监测

模辊加工时间长，在加工过程中金刚石可能发生磨损或破损从而造成工件的超差或报废，因此有必要对切削过程中的刀具状态进行监测。由于难对金刚石刀具进行实时监测及评价，所以一般可以通过对切削力的检测及监控来反映金刚石刀具的磨损或破损。

金刚石刀具的监测主要包括以下几个方面：通过监测切削力来在线监测工艺系统的振动；通过监测切削力来在线控制刀具的磨损；通过监测机床功率来间接获得刀具磨损信息；通过监测切削力和机床功率在线监测刀具的破损，对切削过程中的不正常迹象实行报警和安全保护控制。

3.4.2.4　大尺寸微结构特征辊筒模具超精密加工面临的挑战

随着航空、航天、电子制造、国防装备等重大需求的推动，以及平板显示、聚光光伏产业、LED 照明等领域对微结构阵列光学功能膜片制造需求的增加，对大尺寸面积的微结构功能表面提出了低成本、高效率、高精度地制造的要求，Roll－to－Roll（卷到卷）复制加工技术是一种最具前景的工艺方法。而 Roll－to－Roll 生产工艺中最为关键的技术就是模辊的加工，超精密金刚石车削技术是加工此类模辊的重要手段。超精密器件不断创造制造尺度、精度、效率的新极端，给金刚石超精密切削技术带来若干新的挑战：

①随着加工尺寸的极端化，刀具的寿命已经无法满足大尺寸工件的加工需求，在加工过程中，刀具的磨损导致加工质量的下降已经成为不可避免的问题。例如为加工大型卷到卷压印所需的大尺寸辊筒模具，辊筒长度达到 2000mm 以上，直径超过 500mm，需要克服刀具磨损的限制，才能在如此大尺寸的工件上全面积覆盖地加工具有亚微米级形状精度的微结构阵列。

②随着加工材料的多样化和加工过程的复杂化，难以在加工过程中保持恒定的良好切削状态，所加工的大面积微结构表面容易出现局部区域的微结构缺陷。需要考虑在大范围的加工区域内对微小缺陷进行高效率的检测，进而对微缺陷进行修复再制造，以保障加工表面所有微结构的完整性。

③随着工件形状的复杂化和精度要求的不断提高，单次加工往往难以满足精度要求。刀具的几何形状误差、刀具磨损等都会影响制造产品的几何精度和物理性能。因此，需要开展加工—测量一体化的研究。面向超精密加工过程的测量，不仅要求测量仪器有极高的精度和极大的测量范围；而且考虑到测量效率，往往还要求在机床上进行原位测量。因此，需要对刀具、加工件表面三维形貌实施精密的大范围原位测量，以保障制造质量。

微结构阵列辊筒模具的超精密加工不是一种孤立的方法和单纯的工艺问题，而是一项包含广泛的系统工程。如图 3－34 所示，超精密机床、FTS 装置、刀具、工件都是实现微结构阵列制造的关键要素。与传统的机械加工不同，超精密加工由于加工精度要求高、过程复杂，除了加工本身的工艺和方法之外，还需要有精密的测量技术进行实时的检测以保障加工质量。具体表现为对机床运动误差的测量、对刀具几何形状的测量、对工件表面形貌的测量等。

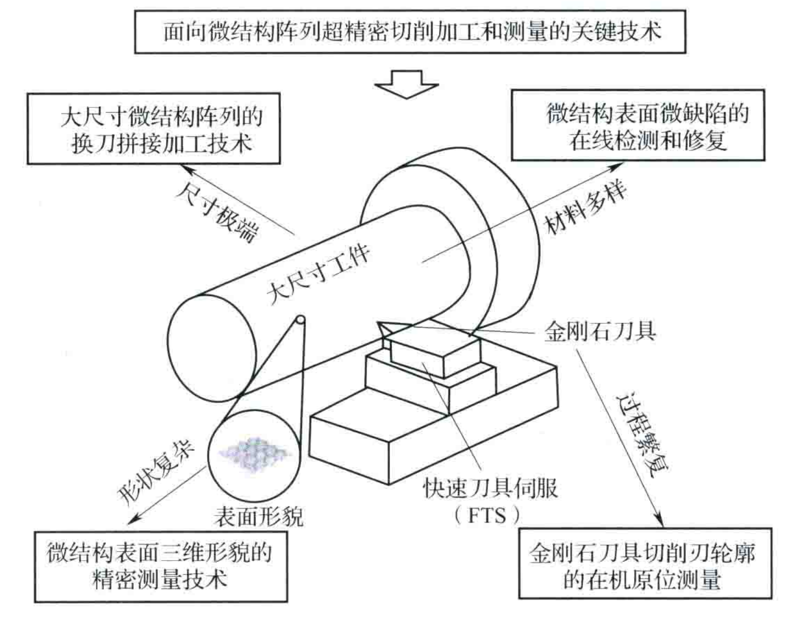


图 3－34　面向微结构阵列超精密切削加工的关键技术

3.5　微结构特征超精密研抛加工机床

3.5.1　微结构特征及微小零件超精密加工设备的发展

飞行器、发动机以及机载设备等航空产品微小型化是航空技术的主要发展方向之一，其中的微小零件多为非硅材料的结构件，具有种类多、形状复杂、精度高、尺寸跨度大等特点，因此对微细制造技术提出了迫切需求，并要求微细制造技术具有更广的加工范围和能力，对非硅材料复杂形状微小零件及微特征的制造需要采用微细切削加工技术实现。

微细切削加工与超精密加工一样，对设备的依赖度非常高。国外的微细切削加工技术已经发展到实用阶段，微切削加工机床已经系列化和商品化。美、日、德等国在微细切削加工领域的研究已经取得了相当的成就，微细切削加工技术在液晶导光板等微光学阵列元件的商业化生产中大量应用。

微结构特征或微小零件的机械加工主要有两种方式，一是用“大设备加工小零件”，这种方式以美国 Kugler 公司和德国 Kern 公司为代表；二是“小东西让小机械制作”，这种方式以日本的桌面微型工厂为代表。

美国 Kugler 公司的数控五坐标联动微铣削加工机床，可实现五坐标联动，导轨采用液体静压支撑，直线电机驱动，回转轴为气体静压轴承，定位精度达到亚微米量级。该机床可以加工三维复杂曲面微小零件特征，如图 3－35（a）所示。

德国 Kern 公司研制的五轴微铣削加工专用机床，见图 3－35（b）。其主要技术指标与特点如下：分辨率 0.1μm，重复定位精度 0.3μm，加工零件精度 1μm，粗糙度 *Ra*0.05μm。主轴转速 36000r/m（可选 50000r/m），五坐标联动，三个直线运动轴采用液体静压导轨，人造花岗岩床身。

在“小东西让小机械制作”的概念下，日本在微小型机床方面的发展处于世界先进水平，有近 20 家公司提供这类设备。虽然型号很多，但归纳起来有如下特点：一般用于



（a）美国Kugler公司Micromil



（b）德国Kern公司Pyramid Nano

图 3－35　微机械结构超精密切削加工机床

加工盘形零件而无后顶尖，加工对象比较专一；CNC 系统分辨率为 10nm 或 1nm，可同时三～四轴控制，使用交流数字伺服驱动系统，检测反馈元件多为分辨率 2.5nm 或 1.5nm 的高精度光栅；机床的机械结构部件，主轴基本采用空气静压轴承，主轴传动采用柔性联轴器、皮带连接等形式，近年使用内装式电机主轴结构的增多；机械进给多使用滚珠丝杠副或静压丝杠螺母副，常组合有压电伸缩或电致伸缩的进给机构；导轨有气浮导轨，油静压或空气静压导轨，以及在双 V 槽中的滚动导轨；底座普遍采用花岗岩平台支撑在空气弹簧隔振系统上。这类机床的加工精度大约是：形状误差 0.1～0.2μm，圆度和平面度 ≤0.1μm，表面粗糙度 Ra 为 0.02～0.05μm，其中的典型代表为桌面微型工厂。

1991 年 9 月日本微机械中心（MMC）在其实施的“微机械技术十年规划”中制订的三大应用目标之一，就是能生产微小型零部件的低能耗工厂，面积不超过数平方米，即微型工厂工程。1990 年，日本通产省工业技术研究院机械工程实验室（MEL）提出了微型工厂的概念，并于 1996 年开发了世界上第一台微型车床，尺寸为 32mm × 25.0mm × 30.5mm，重 100g，如图 3－36 所示。并在之后分别研制了微型车床和微型铣床，与之前的微型车床和一些辅助机构组装在一起，其中的一个微操作手如图 3－37 所示，首先实现了桌面微型工厂的概念。

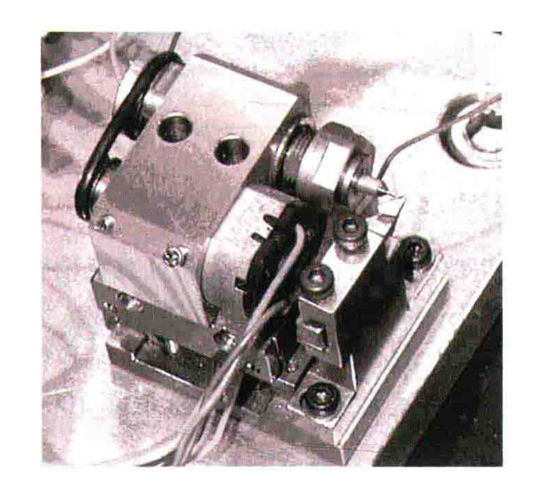


图 3－36　微型车床

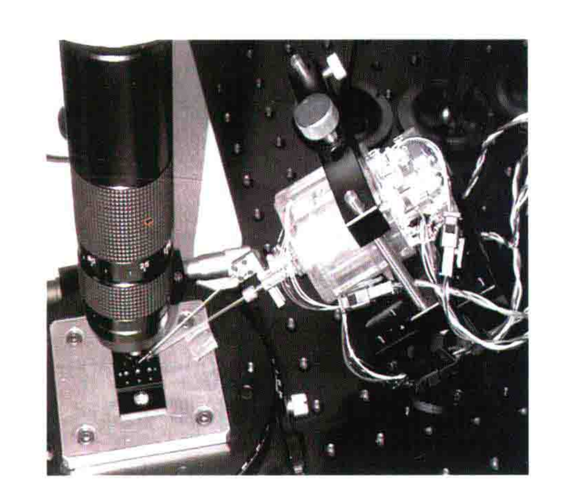
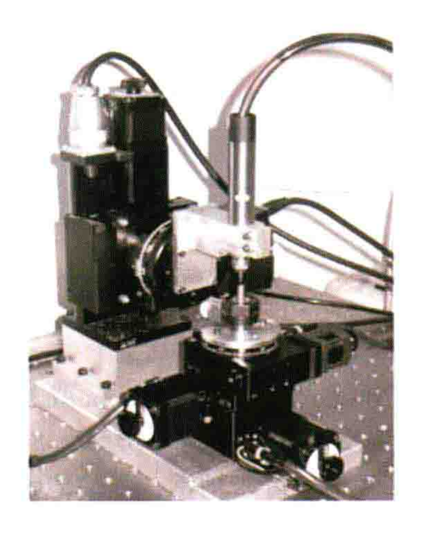


图 3－37　微操作手

韩国首尔国立大学研制了一台五轴微型铣床，尺寸为 294mm × 220mm × 328mm，具有三个直线运动台、二个旋转运动台，主轴为空气涡轮主轴，如图 3 – 38 所示，并用它加工了一些厚 25μm、高 650μm 的微型薄壁和 30μm × 30μm × 320μm 的微立柱，得到了很好的加工效果。



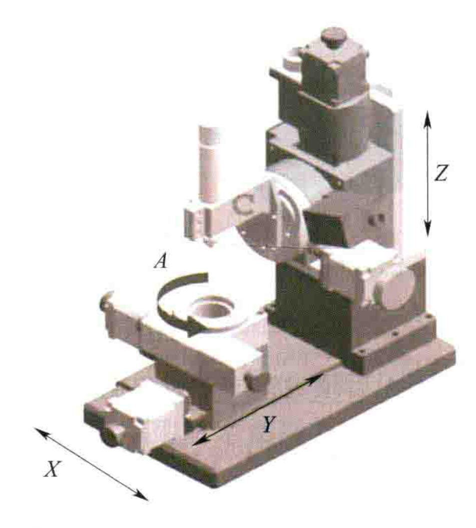


图 3 – 38　五轴微型铣床

日本 FANUC 公司和电气通信大学合作研制的四轴超精密车、铣床 RoBonano Ui 用切削方法实现了自由曲面微细加工，加工出 1mm 大小的人脸三维像（如图 3 – 39 所示）。该机床 X、Z 气浮导轨运动最小分辨率为 1nm，C、B 气浮轴运动最小分辨率分别为 1×10^{-4} 度和 1×10^{-5} 度，供气压力在 6×10^{6} Pa 时最大回转速度为 5500r/m。



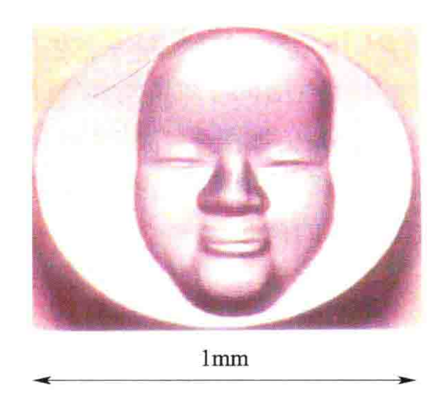


图 3 – 39　RoBonano Ui 机床及加工样件

国内相关单位近年来也研制了微型加工设备，如哈尔滨工业大学以及北京航空精密机械研究所等单位陆续研制了微型精密三轴铣床，如图 3 – 40 所示。其中哈尔滨工业大学研制的机床总体外形尺寸为 300mm × 300mm × 290mm，由 PMAC 八轴运动控制卡、工控机系统、精密工作台、空气涡轮驱动高速主轴、CCD 视频采集系统等组成，分辨率 100nm，定位精度 1μm。

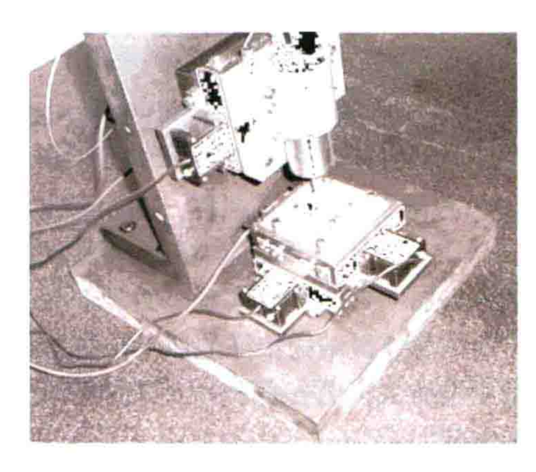



图 3－40　国内研制的三轴微机械加工铣床

3.5.2　典型薄壁微结构特征件的工艺分析

3.5.2.1　应用背景

基于硅微加工的各类传感器，具有尺寸小、加工效率高、成本低、适于大批量生产的特点，但是因其本身的局限性，传感器精度的提高受到限制，因而从目前来看，微小型高精度惯性机电传感器是目前乃至未来高精度机载惯性系统必需的器件。

随着高精度惯性传感器结构的微小型化、工作部位尺寸及形位精度等级的亚微米化，以及新型材料的应用，与传统的精密加工技术迥然不同，微小结构零组件装夹、定位、找正的精细化，刀具的小型化和加工进给量的微量化、非接触面型和尺寸测量显微化等一系列技术难题对传统精密加工技术提出严峻挑战。

加速度计在惯性系统中通过测量载体的加速度，进而计算得到载体的速度、距离和位置（经、纬度）。而加速度计为测力传感器，其原理为将力信号转换为角度信号，再通过信号检测系统转换为电信号后通过电子线路输出；因此挠性结构件是信号产生的源头，其将力信号转换为几何角度信号，是加速度计的核心关键结构件，如图 3－41 所示。

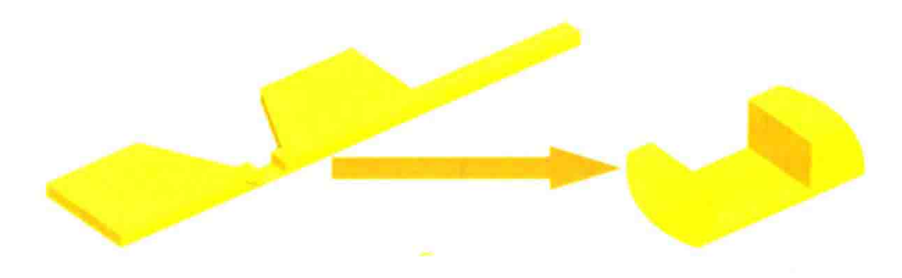


图 3－41　加速度计挠性结构件

3.5.2.2　现有工艺分析

挠性结构件是一个具有薄壁微结构的弹性敏感元件，其结构见图 3－42，槽宽 150μm，长 120μm，深 70μm，槽底厚 10 ±0.5μm。由于该元件面向高精度惯性系统，其表面的微观几何待征和物理力学性能，对工件的使用性能，尤其是对高速、高温、高压条件下工作的工件的可靠性有很大的影响，所以不仅尺寸精度高，其表面质量要求也非常高。

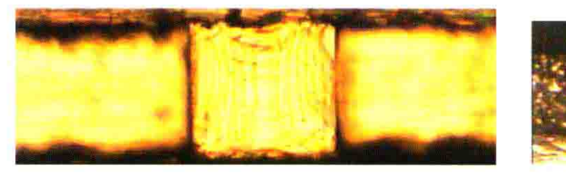
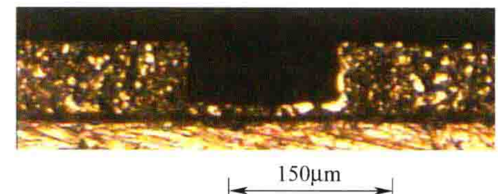



图 3-42 挠性结构件尺寸

精密慢走丝线切割 + 化学光整加工工艺可以实现该薄壁微结构特征的加工，但是由于电加工造成的变质层厚度较大，即使采用化学抛光光整加工，也会由于去除量较大将会带来整体零件的过腐蚀，所以该方案不适合挠性结构件的加工。

采用高速微铣削工艺替代精密慢走丝线切割可以减小电加工引起的变质层厚度，但是由于被加工材料为硬质合金，刀具的磨损很快，随着刀具的磨损，在工件表面产生了明显的刀纹和挤压痕迹，如图 3-43 所示，由此产生的残余应力严重影响了工件的使用性能，也需要通过化学光整或其他抛光工艺将变质层去除，同时减小铣削加工引起的残余应力。同时因为挠性结构件是成对使用的，一对元件的固有频率必须相同，所以工件在去除变质层后的壁厚尺寸精度也必须保证。因此，对挠性结构件的抛光提出了严格的要求。

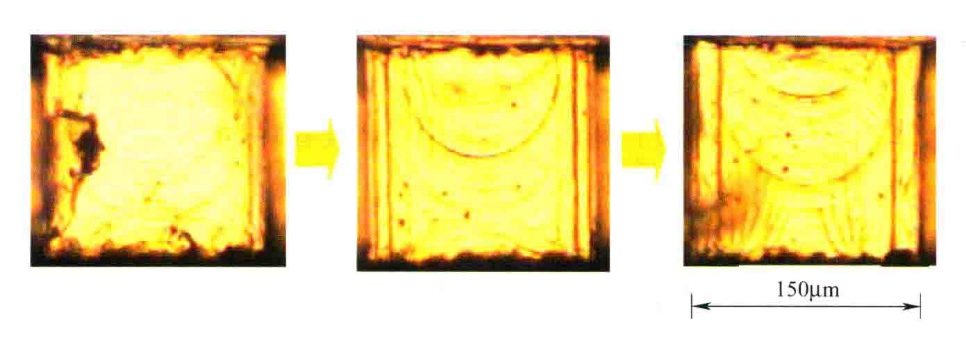


图 3-43 一把铣刀连续加工三个工件后的表面显微照片

采用常规的超精密加工技术中研抛的方式去除变质层，可以提高加工效率，改善加工质量，保证零件精度，提高零件的使用性能，同时降低加工成本。但目前没有针对该种类型的薄壁微结构零件的专用加工设备，因为薄壁零件在加工中对各种影响因素非常敏感，容易产生变形，难以满足精度要求，从而影响产品质量，是精密机械加工中的一个难题；而且对现有的各种精密超精密机床进行改装也有较大的局限性。另一方面，传统的超精密机床尺寸较大，如果能将微小零件的加工设备小型化的同时加工效果保持不变，可以大幅降低能源、场地空间等的资源消耗，进而减少成本；同时，加工设备的尺寸微小化可以降低热变形、应力变形等与设备尺寸有关的误差，同时原有的旋转精度和直线度等不会因尺寸减小而受到影响；设备运动部件质量减少可以使得其更运动容易控制，加工环境如温度等因素也更易控制，反过来进一步提高了加工效率和加工精度。

专用超精密研抛加工设备可以很好地解决挠性结构件的薄壁微结构特征的超精密研抛加工，本节主要介绍该设备研制过程中的一些关键技术，对其他微细精密机械加工设备也同样有借鉴作用。

3.5.3　超精密研抛复合加工设备研发的关键技术

3.5.3.1　薄壁微结构特征超精密研抛机械加工难点分析

由于加速度计挠性结构件最薄处厚度仅为 10μm，去除表面变质层后其厚度需控制在亚微米级精度，需加工的凹槽空间狭小（150μm × 120μm × 70μm）。超精密研抛复合加工系统需要解决的技术难点如下：

①如何有效控制机械加工力的大小，在有效去除表面变质层的同时不至于对薄壁结构造成破坏；

②如何控制刀具的精确进给，实现微小特征尺寸的精确控制；

③在狭小的空间内如何控制刀具和工件的运动轨迹，顺利进行加工。

为克服以上难点，可见该研抛系统应具有以下功能：

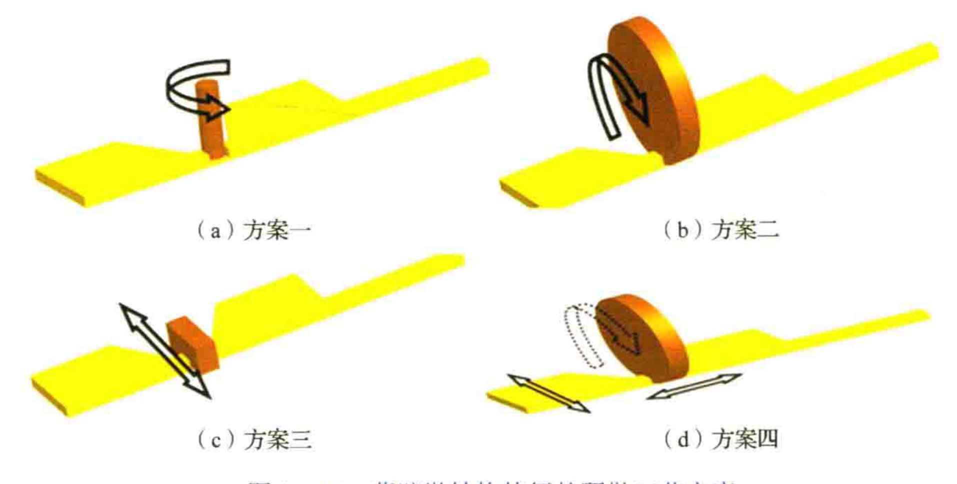
①精确的力检测和控制功能；

②精确的位置控制功能；

③在狭小空间内进行准确定位和运动的功能。

传统的精密加工机床一般只反馈刀具的位置信号，虽然超精密加工中刀具的进给可以达到很高的精度，但是当加工尺度过小时，不能忽视在刀具和工件间形成作用力时产生的机床变形和刀具变形，而只反馈位置信号的机床控制系统是不能反映该变形的，从而影响了加工精度。

在传统的研抛过程中，需在研具与工件之间注入磨料或抛光剂，通过两者之间的滑动或研具的旋转，借助磨粒的微切削作用去除被加工表面的微量材料。由于薄壁结构件加工表面尺寸很小（150μm × 120μm），如果采用旋转的研抛盘端面与工件接触加工的方法，研抛盘的直径应小于微结构 150μm 的槽宽，其自身的加工就具有很大的困难，如图 3－44（a）所示。如果采用旋转的研抛轮外圆面与工件接触加工，只需研抛轮厚度小于 150μm 即可，但该方案对研抛系统主轴的回转精度及振动控制要求很高，如图 3－44（b）所示。如果采用研具底面与工件接触加工，由于只有往复运动较难生成良好的研抛轨迹，研具运动范围较小时，易在研具同一处造成磨损，而研具运动范围较大时，对机床导轨精度要求很高，如图 3－44（c）所示。



（a）方案一　（b）方案二

（c）方案三　（d）方案四

图 3－44　薄壁微结构特征的研抛工艺方案

为此采用方案二与方案三相结合的方法可以有效解决薄壁微结构特征的超精密研抛并尽可能降低对设备的要求，采用较大直径的研抛轮代替方案三中的研具，研抛轮轮缘进入微结构槽内与工件表面接触，两者之间加入研磨膏并做相对运动去除材料，每完成一次加工后研抛轮旋转一个小角度，避免研抛轮在同一处反复磨损，如图 3－44（d）所示。

3.5.3.2 基于力和位移控制的薄壁微结构特征超精密研抛系统总体方案

根据上面的工艺分析可知研抛设备需要的运动包括：研抛轮在垂直于槽表面的方向精确进给；工件沿槽开口方向做往复运动；为得到均匀的运动轨迹，在槽宽方向也应有一行程较小的往复运动与平行于槽向的主往复运动复合；为保证研抛轮与槽的平行，应设置一转台用于调节两者的位置关系；安装研抛轮的主轴。

综述所述，超精密研抛系统具有三个直线工作台（*X*、*Y*、*Z* 轴），一个旋转轴工作台（*B* 轴），一个主轴（*C* 轴）。为控制研抛力，应设置微力感知夹具，为控制研抛轮精确进给，该方向应设置宏微复合运动平台，如图 3－45 所示。

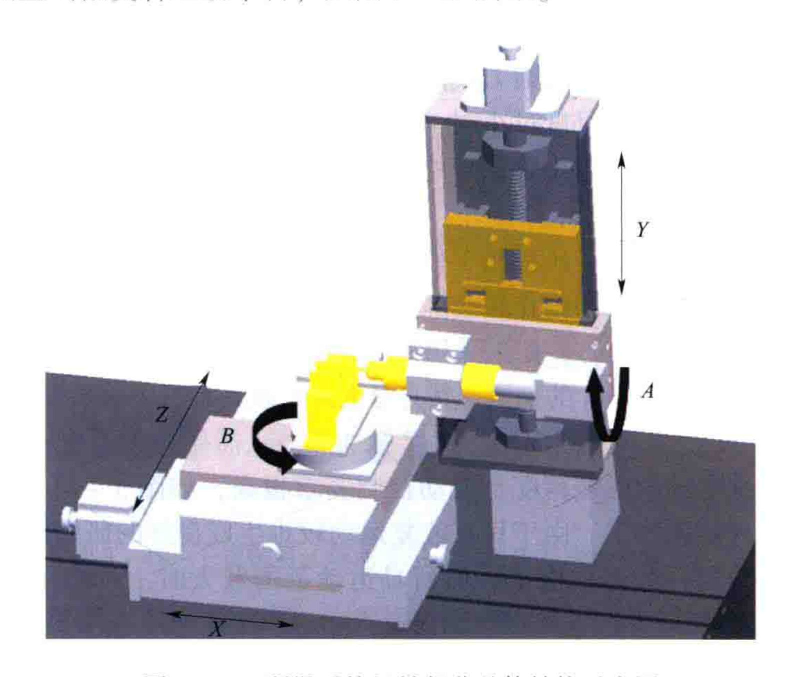


图 3－45　研抛系统机械部分总体结构示意图

为实现研抛力的精确检测控制和准确反映机床与刀具变形，采用具有微力感知功能的夹具，该夹具由柔性铰链放大机构加电涡流传感器组成，在研抛过程中提供反映被装夹工件与研抛轮接触情况的力信号，并且控制系统可依据此信号判断机床与刀具的变形程度，进而控制加工过程。

为实现研抛工具的精确进给，在进给方向上采用宏微复合运动平台，首先由大行程、粗分辨率的步进电机加滚珠丝杠进行大范围内微米级的粗定位，然后由小行程、高分辨率的电致伸缩陶瓷加柔性铰链结构进行小范围内纳米级的精确定位。

选用工业计算机作为控制系统的核心部分，并采用安装在工业计算机总线插槽内的板卡实现相关的驱动、采集等功能。

为在加工过程中同时使用位置反馈信号和研抛力反馈信号进行控制，系统的检测分两

个部分：研抛力的检测及各轴位置的检测。研抛力的检测由具有微力感知功能的夹具完成，其变化情况由安装在夹具上的电涡流传感器反馈的 0 ~ 5V 的模拟电压表示，该模拟电压由安装在工控机内的模入模出接口卡进行 A/D 转换后反馈回控制系统；各轴位置的检测中，*Y*、*Z* 两轴由光栅尺反馈精确的位置信号，该反馈信号通过安装在工控机内的运动控制卡的编码器接口进入系统，其余轴由于位置精度要求不高，其位置检测根据运动控制系统发出的该轴脉冲数，也即该轴的逻辑位置确定。

系统的控制也分两部分：各轴步进电机的宏运动控制及 *Y* 轴电致伸缩陶瓷的微运动控制。步进电机由相应的步进电机驱动器控制，步进电机驱动器与安装在工控机内的运动控制卡相连；电致伸缩陶瓷的微运动控制由电致伸缩陶瓷控制电源输出的 0 ~ 200V 的电压控制，该控制电源输出电压的大小则由模入模出接口卡经 D/A 转换后的 0 ~ 5V 的模拟电压进行控制，如图 3 – 46 所示。

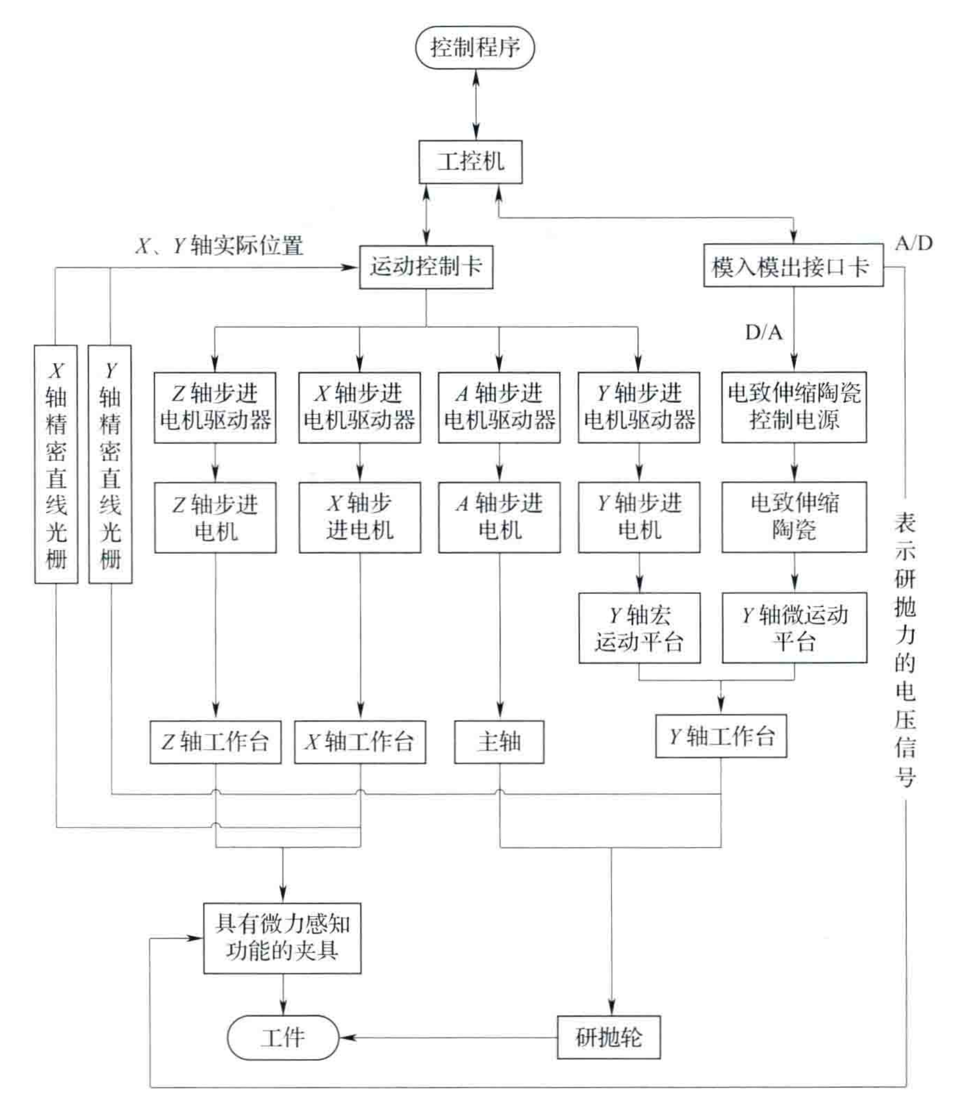


图 3 – 46　研抛系统检测和控制部分总体框图

实物平台如图 3 – 47 所示，三个直线工作台均为步进电机驱动滚珠螺杆的结构，其中 *Y* 轴安装在由大理石固定的直角固定块上，结合电致伸缩陶瓷驱动柔性铰链的微位移机构

组成宏微复合运动平台；安装研抛轮的主轴 A 固定在其上，由 Y 轴的运动带动研抛轮进给；Z 轴安装在大理石台上，带动工件于微结构槽开口方向做往复运动；X 轴安装在 Z 轴工作台上，带动工件于微结构槽宽方向做往复运动；转轴 B 为手动调节，安装在 X 轴工作台上，在调整研抛轮与微结构槽的平行度时使用。具有微力感知和检测功能的夹具安装在 B 轴工作台上，在加工过程中实时反馈工件所受的研抛力。

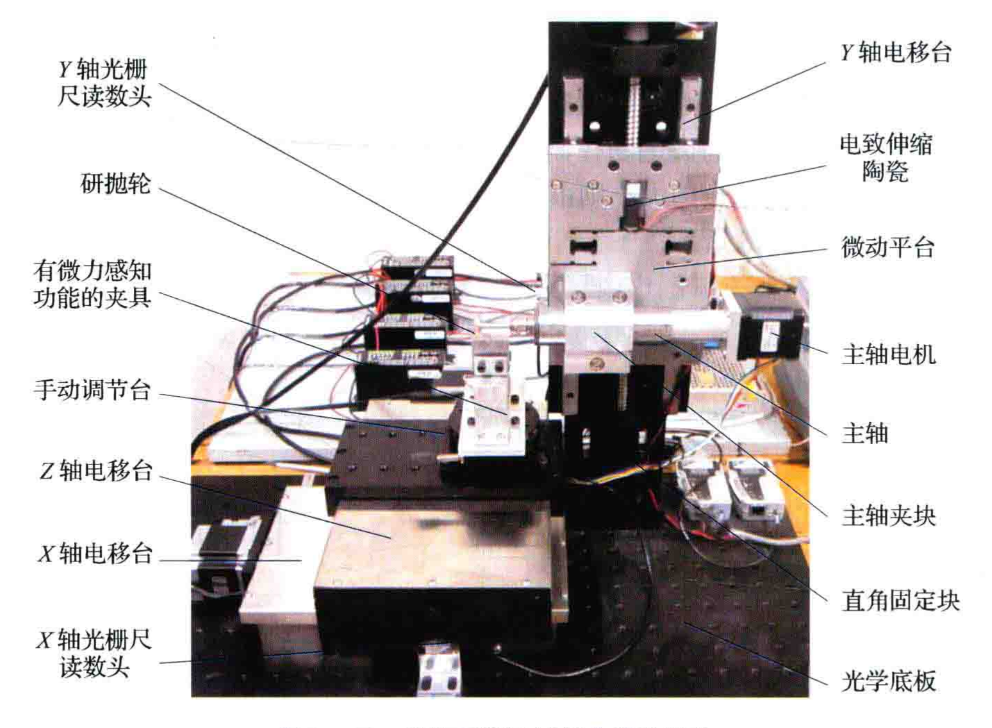


图 3-47　研抛系统机械部分实物照片

Y 轴的进给量决定了研抛去除量，其定位精度要求很高；X 轴要求在其运动方向上，研抛轮的两端运动终点与微结构槽侧壁之间始终保持一个合理的距离，其定位精度要求较高；Z 轴的运动则是在微结构槽的通槽方向做往复运动，其定位精度要求较低；对于安装研抛轮的主轴，其回转误差极大影响了研抛轮在微结构槽内的位置误差，对它的精度也有较高要求。

3.5.4.3　具有微力感知功能夹具

研抛设备需要实时检测薄壁微结构研抛过程中的加工力并进行反馈控制，由于加工过程中的主切削力为研抛轮进给方向，为此采用具有微力感知的智能专用夹具，可以替代专用测力仪。

夹具结构示意图如图 3-48 所示，图中 A、B、D 处均为较薄的柔性铰链结构，使其在受外界作用力时发生弹性变形。该柔性铰链结构具有放大功能，在较小的力作用下，可在 C 端输出较为明显的变形。其简化模型如图 3-49 所示，夹具的 A、B、D 处均能绕自身进行微小的转动，当 E 处受到研抛力的作用时，BD 杆绕 D 产生微小转动，B 处输出一个位移，使得 AC 杆绕 A 处产生微小转动，C 处输出一个位移。可见该结构具有放大位移的功能，而且具有二级放大功能，第一级为以 D 点为转动点的 BD 杠杆，第二级为以 A 点为转动点的 AC 杠杆，C 处的输出位移与 E 处的输入位移放大比为 $A_{放大}$。

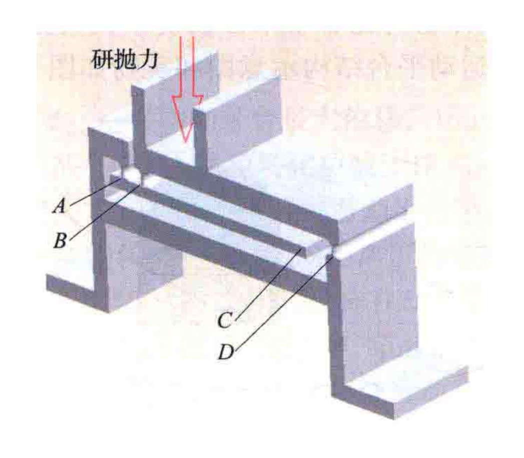



图3-48 夹具结构示意图

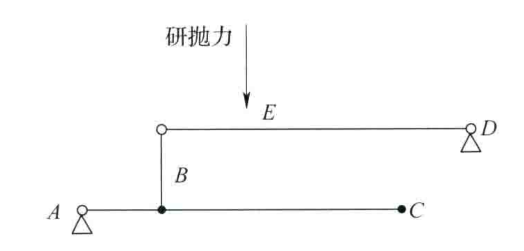


图3-49 夹具铰链原理简化图

在 C 处装有电涡流传感器测量输出位移，能将位移信号转化为0~5V的模拟电压输出，由于传感器的线性工作区间内输出电压大小与被测量位移量的关系是定值，由此可计算夹具 C 点输出电压大小与输入端 E 点位移量的关系；此外对夹具进行有限元静力学分析方法可以得到在 E 点施加力后 C 点的变形量，从而可以从 C 点电涡流传感器的输出电压推算出 E 点的受力大小。

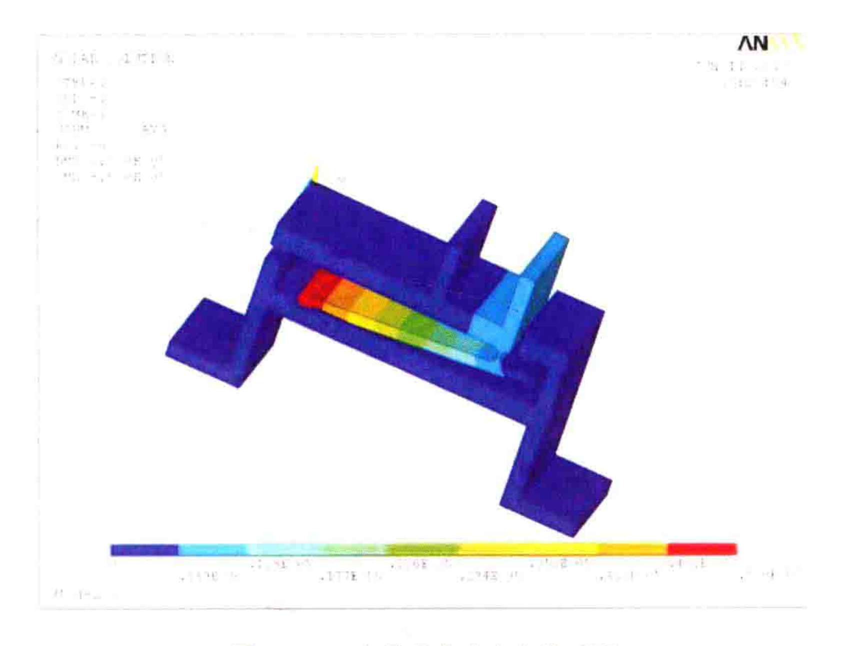


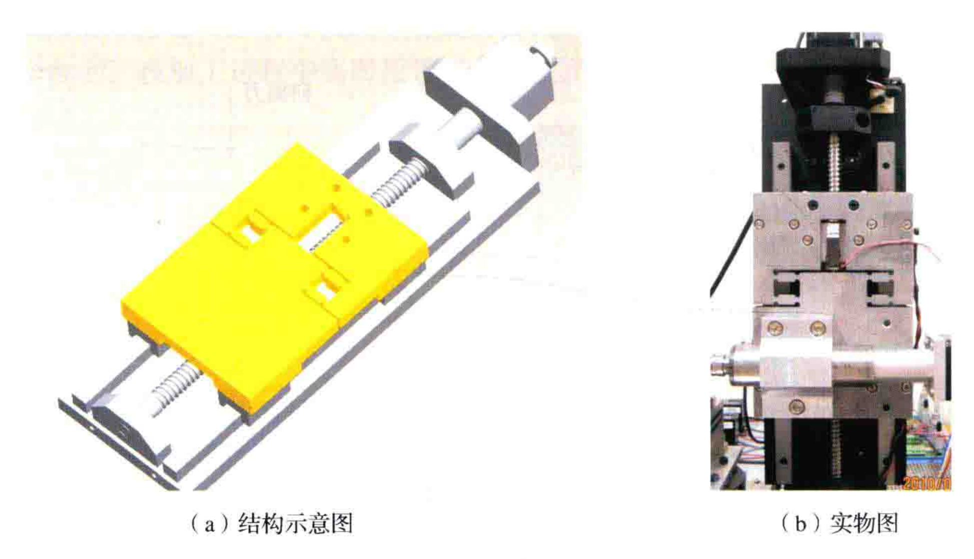
图3-50 夹具受力节点位移云图

由于夹具制造误差的存在，以及有限元计算中也存在划分网格产生的误差，实际使用中需要对夹具进行标定。此外，在研抛过程中，如果夹具随着系统的运动发生共振，将影响反馈力信号的准确性，甚至还可能导致加工无法进行，所以有必要对夹具固有频率进行计算，使其远离设备各运动部件的频率。

3.5.4.4 宏微复合运动平台

Y 轴方向为研抛轮进给方向，既要实现毫米级的大范围宏动定位，同时又要能够进行高分辨率的精确定位。针对该要求，考虑实现的便利性和较低的成本，设计了以滚

珠丝杠电动位移台为主体的宏动平台，结合电致伸缩陶瓷驱动柔性铰链结构的微动平台，实现大范围内纳米级的精确定位。宏微复合运动平台结构示意图和实物如图 3－51 所示。



（a）结构示意图　　　　（b）实物图

图 3－51　宏微复合运动平台结构示意图及实物图

电动位移宏动平台采用滚珠丝杠加滚动导轨结构，辅以步进电机或伺服电机驱动，可以实现大范围内 1μm 的微量进给。以柔性铰链结构组成的微动平台为该部分的核心，本节中涉及的弹性铰链结构在受到电致伸缩陶瓷最大输出力 200N 的作用下，能产生约 16μm 的输出，其节点位移云图如图 3－52 所示。

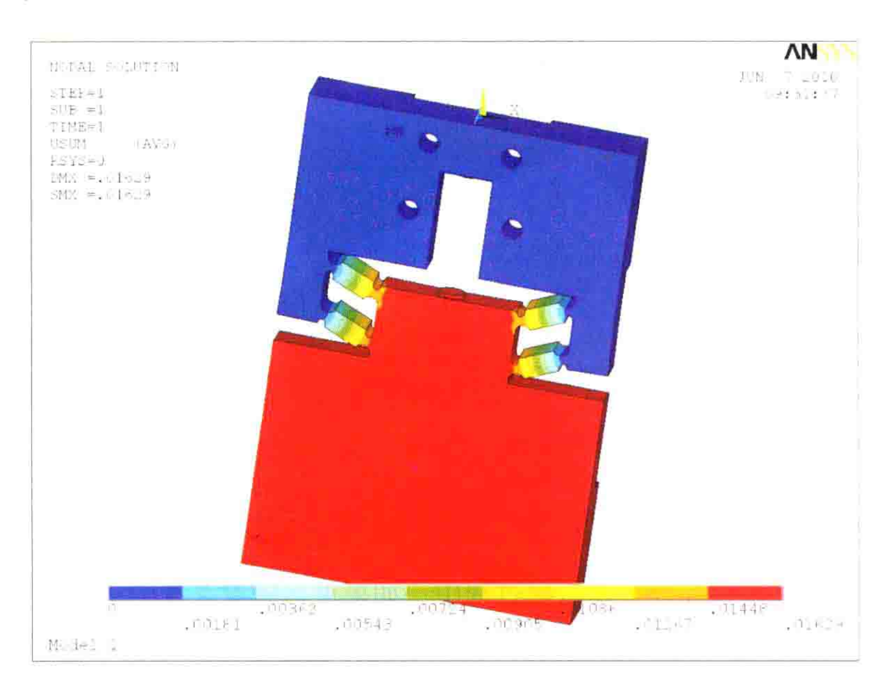


图 3－52　柔性铰链结构节点位移云图

驱动电致伸缩陶瓷的信号为模入模出卡 D/A 通道的 0～5V 模拟电压，微动平台能产生的最小移动步距 $S_{微动}$ 理论上为

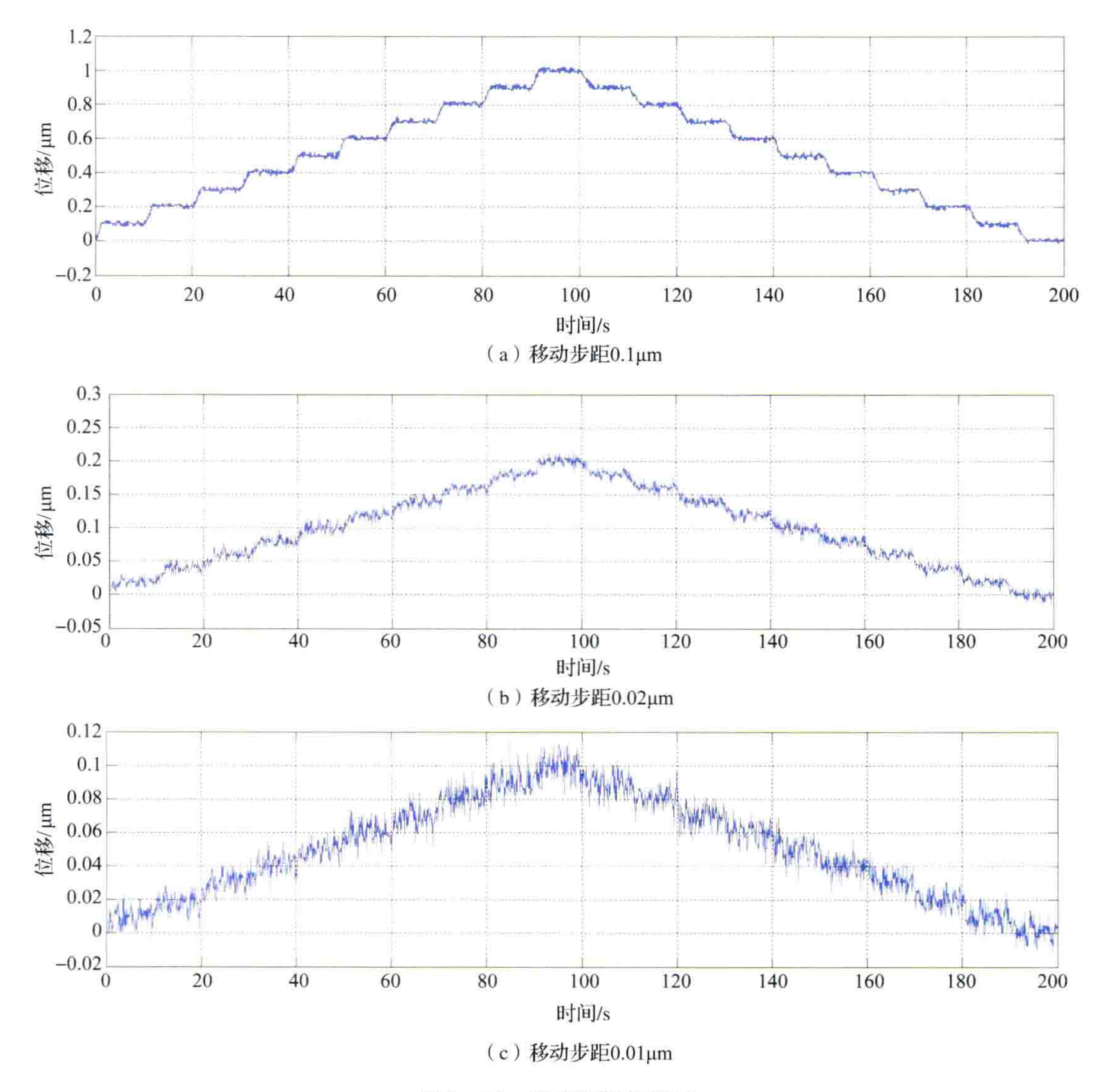
$$S_{微动} = \frac{L_{max}}{2^N - 1} \quad (3-3)$$

式中：L_{max}——微动平台最大位移，16μm；

N——D/A 通道转化位数，12 位。

代入式（3-3）计算得微动平台最小移动步距为 0.004μm。

测试该系统在微小移动距离下的性能，控制工作台分别以 0.01μm、0.02μm、0.1μm 的步距正向移动 10 次，再反向移动至零，在每一步运动完成后停留 10s，得到位置变化曲线如图 3-53 所示。可见在 0.1μm 的移动步距下，曲线的台阶形状清晰，对应的位置准确，即在研抛过程中，宏微复合运动平台以亚微米精度进给，当移动步距减小至 0.02μm 时，台阶形状开始模糊，至 0.01μm 时已很难分辨台阶形状，可见该宏微复合运动平台的运动控制分辨率可达 0.02μm。



（a）移动步距0.1μm

（b）移动步距0.02μm

（c）移动步距0.01μm

图 3-53　微步距性能测试

3.6 圆弧刃金刚石刀具刃磨机

3.6.1 概述

金刚石独特的晶体结构使其具有自然界最高的硬度、刚性、折射率和导热系数，以及极高的抗磨损性、抗腐蚀性及化学稳定性。单晶金刚石的优良特性可以满足精密及超精密切削对刀具材料的大多数要求，是理想的超精密切削刀具材料。金刚石无内部晶界的均匀晶体结构使刀具刃口在理论上可以达到原子级的平直度与锋利度，切削时切薄能力强、精度高、切削力小；其高硬度及良好的抗磨损性、抗腐蚀性和化学稳定性可保证刀具具有超长寿命，从而能进行长时间的持续切削，并可减小因刀具磨损对零件精度的影响；其高导热系数可降低切削温度和零件的热变形。单晶金刚石刀具由于其优良的物理及化学性能，在超精密加工中占有其重要的地位，特别是高精度圆弧刃金刚石刀具在加工球面、非球面、曲面等实现超精密切削加工中更是有着不可替代的作用，但由于天然金刚石晶体结构的特殊性，其加工机理与普通刀具有很大的差异，对金刚石刀具刃磨设备也有特殊的要求。

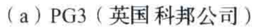
金刚石刀具的研磨加工最早开始使用的是用于研磨钻石首饰的双顶尖式研磨机，铸铁盘安装在两端具有精密反顶尖的轴上，顶尖用硬木（红松）或铸铁制成，能自动适应研磨盘的顶尖，达到较高的旋转精度。研磨盘的轴由柔软的丝质平皮带驱动，减小了振动，使研磨盘转动平稳，研磨盘一般采用高磷铸铁。这种结构的研磨盘跳动量在 10μm 以上，且顶尖及轴容易磨损，因此只能满足一般金刚石刀具的刃磨。

随着超精密加工的发展对金刚石刀具的要求越来越高，切削刃口半径直接影响了超精密切削加工中的切薄能力以及切削工件的表面质量，要得到更小的刃口半径，需要严格控制研磨设备的振动，于是空气静压主轴技术在金刚石刀具研磨机上得到了应用。同时以光学非球面零件为代表的复杂曲面超精密切削加工提出了对高精度圆弧刃金刚石刀具的需求，新一代的圆弧刃金刚石刀具刃磨设备近年来也得到了发展。

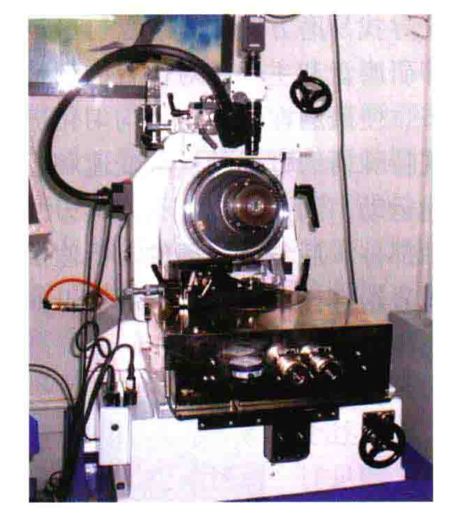
英国、日本、瑞士等国都有自己较成熟的圆弧刃金刚石刀具刃磨设备产品，并且形成了系列化。如图 3 - 54（a）和（b）所示为英国科邦公司生产的的天然金刚石刀具刃磨机。此外还有些公司刃磨机可以研磨 PCD 金刚石刀具，如图 3 - 54（c）所示瑞士伊瓦格公司的 RS 系列，以及如图 3 - 54（d）所示台湾远山公司的 FC 系列等。

国内近几年也有几家单位开始研制金刚石研磨机，北京航空精密机械研究所于 1995 年研制开发出超精密金刚石研磨机，采用气浮轴承支撑的高精度主轴，并带有空气导轨对研磨盘进行修整，该机床已实现了直线刃金刚石刀具的超精密刃磨。其技术指标为：刀具刃口半径 $\rho \leq 0.1\mu m$；刀具表面粗糙度 $Ra \leq 0.01\mu m$。2007 年自主研发了一台 DMG - 100 超精密圆弧刃金刚石刀具刃磨机，该设备采用了高精度空气静压轴承行星结构（详见第 2 章 2.2），其主要技术指标如下：空气静压主轴旋转精度小于 0.1μm，往复运动导轨运动直线精度 0.1μm/100mm，微量进给分辨率 0.1μm，并具备恒力加载功能；刃磨主轴最高转速 14000r/m，刀具圆弧波纹度小于 0.5μm，刀具刃口锋利度小于 10nm，刀具表面粗糙度 Ra 小于 0.01μm。

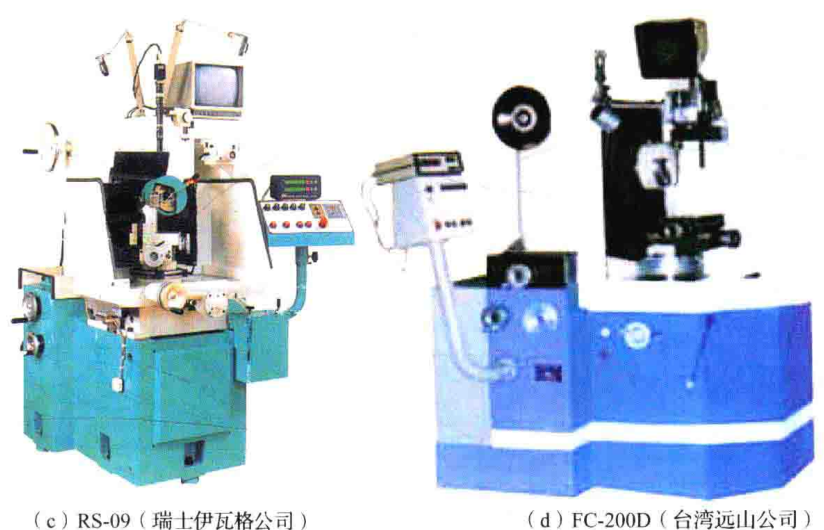




（a）PG3（英国科邦公司）



（b）PG3b（英国科邦公司）



（c）RS-09（瑞士伊瓦格公司）　（d）FC-200D（台湾远山公司）

图 3－54　圆弧刃金刚石刀具刃磨设备

3.6.2　圆弧刃单晶金刚石刀具刃磨机关键技术

金刚石晶体是各向异性极强的脆性材料，不同的晶面、晶向具有差异很大的物理特性和力学性能，从而影响到金刚石刀具的制备和使用。金刚石刀具制造的核心问题是精确控制刀具刃口表层晶体的微量去除轨迹，这也正是金刚石刀具超精密刃磨设备设计研制的基础。摆轴、砂轮轴、行星轴、进给导轨等均采用成熟的空气静压轴承。



图 3－55　国内研制的金刚石刀具刃磨机

3.6.2.1　总体布局方案设计

实现高精度圆弧刃金刚石刀具刃磨所需的运动包括：实现刃磨材料去除的主轴（研磨盘）高

速回转、用于寻找易磨方向的研磨盘行星运动、用于刀尖圆弧刃磨的刀具摆轴偏摆、刀尖圆弧半径值即研磨盘和主轴相对位置的调整、刀具研磨姿态的三维调整、研磨特定后角刀具的后角调节、使研磨在研磨盘上均匀化进行的往复摆动、刀具刃口圆弧半径的二维调整运动以及实现特殊研磨方式的摆轴变速和悬停等。

针对上述运动，圆弧刃金刚石刀具刃磨机一般包括以下几个部分：高速砂轮轴部件、行星运动主轴部件、后角调整部件、低速摆轴部件、刀具夹具部件、往复运动部件、进给轴部件、恒力进给部件以及底座等部件，如图 3－56 所示的为一典型的圆弧刃金刚石刀具刃磨设备的结构示意图。

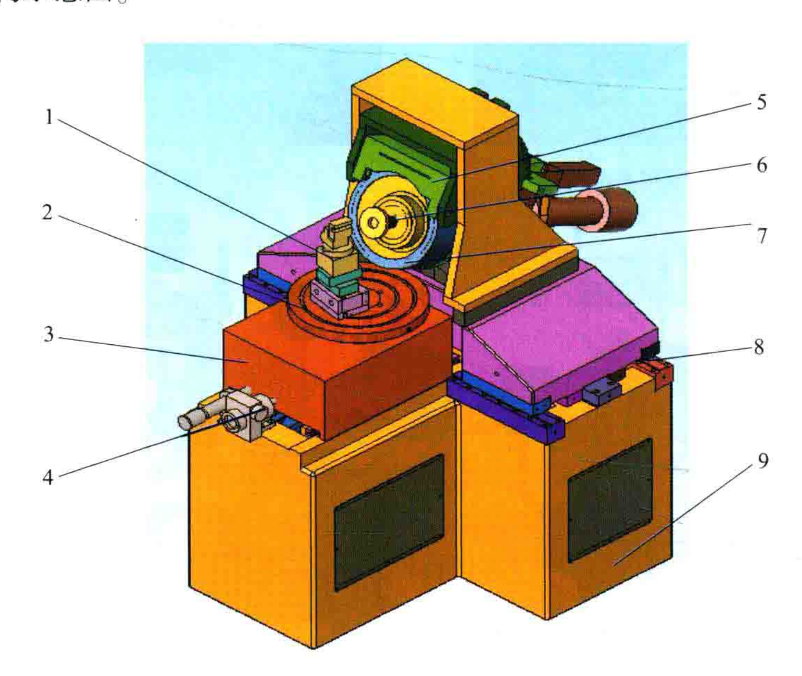


图 3－56　圆弧刃金刚石刀具刃磨机总体结构

1—刀具夹具部件；2—低速摆轴部件；3—进给轴部件；4—恒力进给部件；5—后角调整部件（俯仰调节机构）；6—高速砂轮轴部件；7—行星运动主轴部件；8—往复运动部件；9—底座

3.6.2.2　行星运动机构分析

（1）天然金刚石晶体的特性

天然金刚石晶体是各向异性极强的脆性材料，不同的晶面晶向具有差异很大的物理特性和力学性能，从而影响到金刚石刀具的制备和使用。从刀具的使用性能分析，应追求金刚石刀具拥有锋利的刃口半径和良好的抗磨损性能，但从刀具制造角度分析，则应考虑刃磨出锋利刃口的可行性和制造成本。

金刚石晶体有三个典型晶面：（100）、（110）和（111），不同的晶面由于晶体结构不同造成磨削时的去除率不同，即使在同一晶面上由于各个方向的动态微观机械强度不同也形成了一个晶面内存在所谓的易磨方向和难磨方向。由于上述各向异性，使得研磨高精度的金刚石刀具异常困难，特别是高精度的圆弧刃金刚石刀具，切削刃圆弧上存在很强的各向异性，很难达到很高的圆弧轮廓精度。

由于天然金刚石晶体（111）晶面硬度太高，其脆塑性转变临界值最小，很难刃磨出锋利的切削刃，所以较少用作前后刀面。目前一般选用（110）晶面和（100）晶面作为

金刚石刀具的前后刀面，兼顾了刀具刃磨质量和抗磨损性能。

（2）行星运动机构作用

为了实现金刚石刀具刃磨中的均匀去除，就要求刃磨设备中研磨盘能够实现各个方向的刃磨，这是金刚石刃磨设备中行星运动机构的最主要的作用，也是影响圆弧刃刀具成形质量的一个重要因素。其次，由于金刚石晶体一个晶面内各个方向的磨削特性也不相同，在最后的刀具精磨阶段可以利用行星运动机构以及磨削力监测系统找到易磨方向，并停止行星运动，只在易磨方向进行刀具的刃磨，从而可以进一步提高刀具的刃磨质量。

金刚石刀具刃磨工艺要求磨削砂轮的端面具有极高的精度，这不仅要求高速砂轮轴的端面跳动误差尽量小，同时要求外层行星轴也尽量减小回转误差，而且高速轴和行星轴的轴线平行度误差也直接影响了砂轮做行星运动时的端面跳动。针对上述要求，金刚石刃磨机的行星运动机构采用了独特的套装空气静压轴承行星运动机构，详见第 2 章 2. 2。

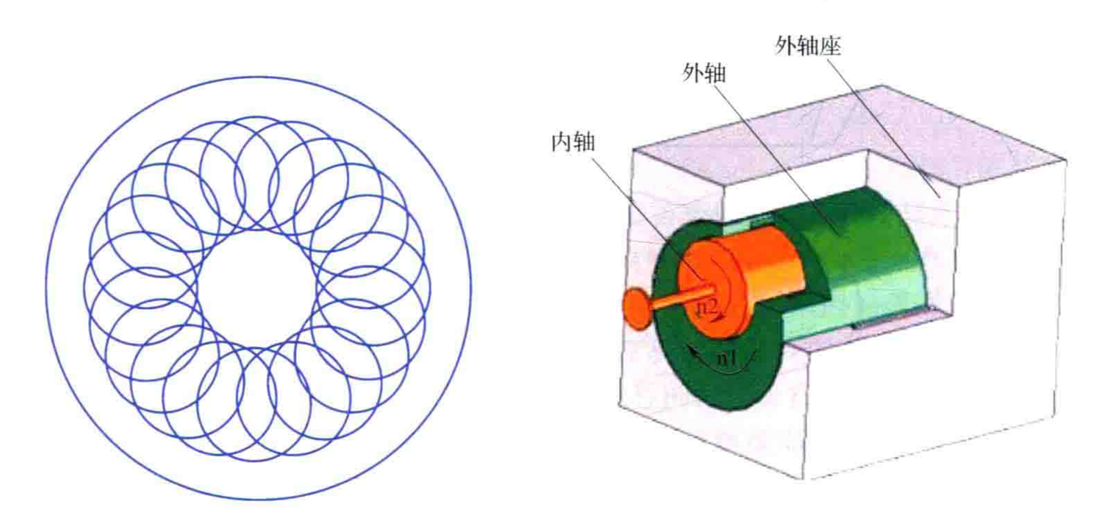


图 3 – 57　行星机构原理图

3. 6. 2. 3　后角调整部件

单晶金刚石刀具的后刀面有两种形式，即柱形后刀面和锥形后刀面。两种形式的刀具各有特点，刃磨时工艺方法也不尽相同，这就要求刃磨机需具备两种形式刀具的刃磨功能。

（1）两种后刀面类型刀具的特点

如图 3 – 58 所示，柱形后刀面金刚石刀具的后刀面为圆柱面，用与圆柱轴线成一定角度的平面切出刀具的前刀面，同时形成刀具的后角。理论上由于前刀面与圆柱面轴线不垂直，其切削刃是一椭圆而不是圆，而且刀具后角在顶点处为初始预设值，越往两侧后角越小，所以高精度的圆弧刃刀具一般不采用这种形式。但是这种刀具也有其优点，前刀面和底面的刀具切削刃圆弧尺寸完全相同，刀具重新修磨前刀面后，其圆弧刃的半径不发生变化，切削加工时刀具半径补偿值不需要进行调整。

如图 3 – 59 所示，锥形后刀面金刚石刀具的后刀面为圆锥面，用与圆锥面轴线垂直的平面切出刀具的前刀面，圆锥的半角即为刀具的后角。锥形后刀面金刚石刀具的切削刃理论上是真圆，而且重新修磨前刀面后，其切削刃仍为圆形，刀具后角在整个刀具切削刃圆弧段上都相同为初始预设值，所以一般高精度的圆弧刃刀具都采用这种形式。但是修磨前

刀面后，其圆弧直径发生了变化，切削加工时需要重新测量刀具圆弧半径并调整刀具半径补偿值。

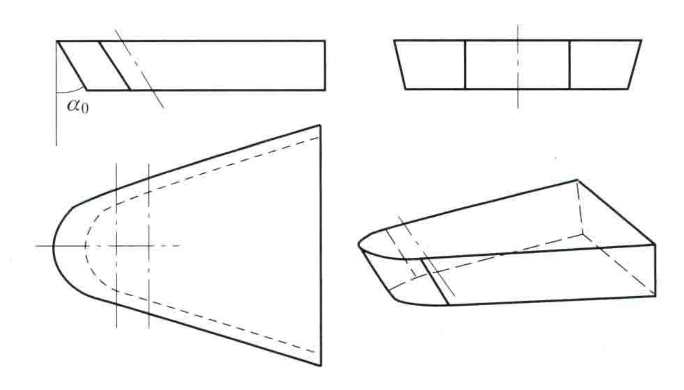


图 3-58　柱形后刀面的圆弧刃金刚石刀具

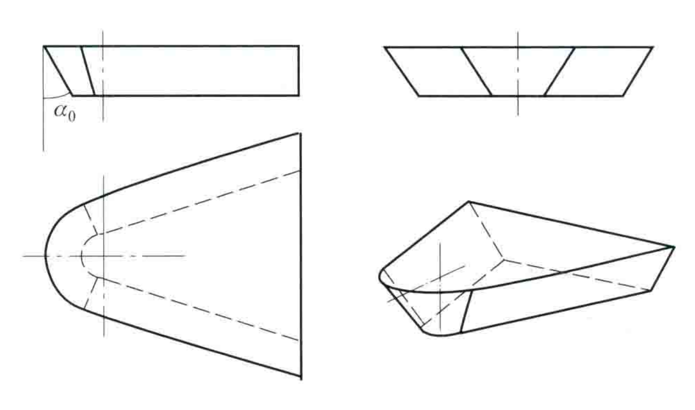


图 3-59　锥形后刀面的金刚石刀具

（2）两种类型后刀面刀具的刃磨原理及实现方式

刃磨柱形后刀面金刚石刀具时，砂轮主轴的轴线与刀具摆轴的轴线相互垂直，如图 3-60 所示。刀具后角值由夹具带着刀具旋转 θ 得到，研磨盘盘面到刀具摆轴轴线的距离 R 为一定值，刀具摆轴回转后即得到一半径为 R 的圆柱面即为刀具的后刀面。由于前刀面与该圆柱面的轴线成 θ 角，所以在前刀面上形成的切削刃是一椭圆，该椭圆长轴为 $R/\cos\theta$。

研磨锥形后刀面金刚石刀具时，研磨主轴在垂直面内摆动一角度 θ 后，研磨主轴的轴线和刀具摆轴的轴线成 θ 角，即为刀具的后角值，如图 3-61 所示。研磨盘盘面到刀具摆轴轴线的距离是一变值，只有在中线位置时为 R，刀具摆轴回转后得到的是一个顶面半径为 R 的锥体后刀面。由于前刀面和刀具摆轴轴线垂直，切削刃圆弧就是一 R 为半径的圆中的一部分，刀具底面与后刀面的交线也是一个圆，这个圆的半径与刀具后角及刀具的厚度有关。

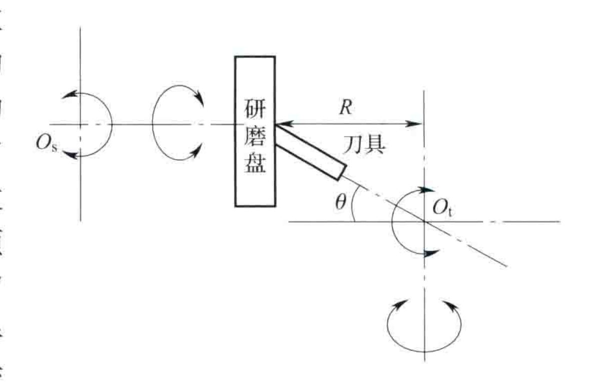


图 3-60　柱形后刀面圆弧刃金刚石刀具的研磨运动分析

针对上述两种研磨方式，刃磨设备设计时考虑采用相应的机构实现其功能。行星运动机构整体安装在往复运动导轨拖板的俯仰调节机构上，通过手动控制调整研磨盘主轴轴线与刀具摆轴轴线的倾角，实现锥面后刀面金刚石刀具的刃磨。

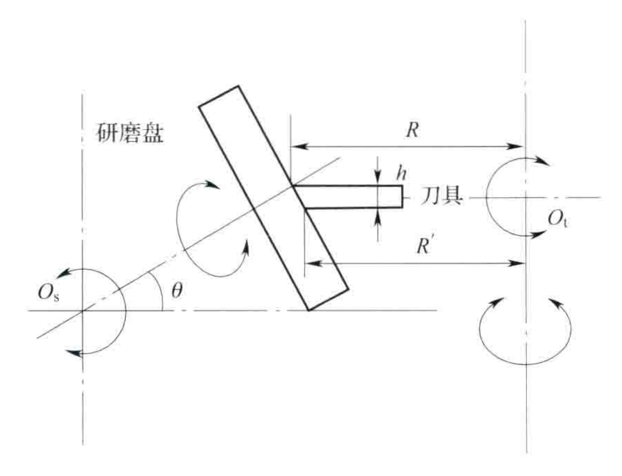


图3－61　锥形后刀面圆弧刃金刚石刀具的研磨运动分析

刀具夹具部件包含金刚石刀具的快速装夹定位机构、二维水平直线运动调整机构以及俯仰调整机构等，其中二维调整机构是为了保证将需要刃磨的刀具圆弧中心调整到与刃磨设备摆轴的中心重合，也可以说是调整刀具切削刃圆弧半径的大小；俯仰调整机构就是为了在柱面后刀面金刚石刀具刃磨时调节其后角。

3.6.2.4　微量进给及恒力加载部件

金刚石刀具刃磨进给控制与一般超精密加工设备有所不同，并不是采用位移控制法，而是采用压力控制法，即刃磨过程中被磨刀具与研磨盘之间保持恒定的压力。

研磨压力对天然金刚石刀具的圆弧精度有较大影响，而恒力加载部件可为研磨过程提供稳定的研磨压力。恒力加载部件最简单、控制精度最高的就是通过施加不同的配重块来实现，原理设计如图3－62所示。研磨过程的恒压力控制及实现原理如下：首先使用由粗动螺母和丝杆构成的进给装置，让刀尖和研磨盘端面接触，同时通过调节微动螺杆使挡块和螺杆顶头间松开一个间隙 W，再用退刀装置将刀尖和研磨盘脱开。然后，电主轴开通，研磨盘高速回转，用缓进给装置再次使刀尖和研磨盘接触，并松开缓进给装置。这样研磨过程就控制在恒力下进行，直到挡块和螺杆顶头接触为止，即刀尖实现了去除量 W。

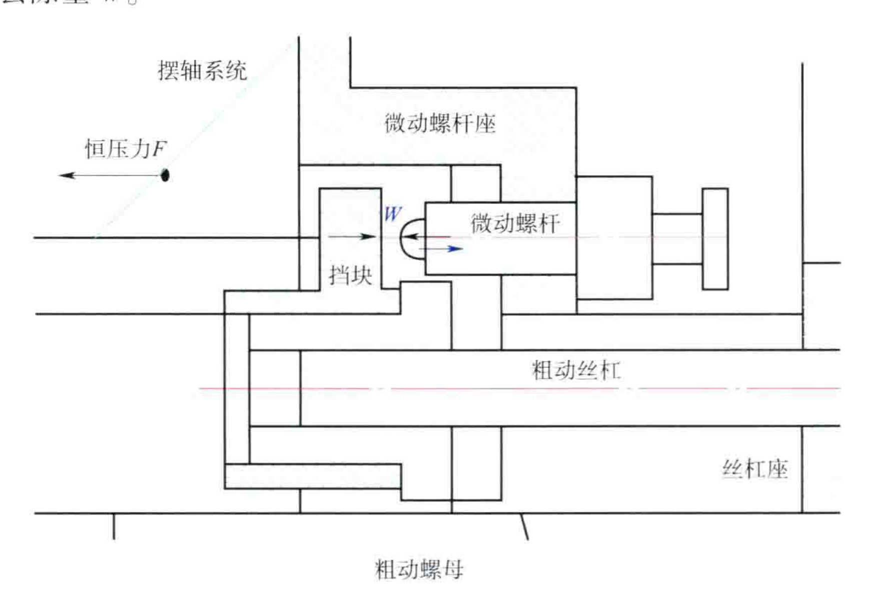


图3－62　恒压力系统设计原理图

3.6.2.5 高精度天然金刚石刀具圆弧精度在位测量装置

利用三维精密微调机构、金刚石刀具研磨机的进给导轨、往复导轨及摆轴、便携式原子力显微镜探针扫描系统或光学显微镜等可实现高精度天然金刚石刀具圆弧精度在位测量。借助摆轴的超精密回转运动，通过便携式探针系统对刀具后刀面进行扫描，并对采样数据进行三维图像重构处理和误差分析，包括 AFM 系统误差和便携式探针系统支撑结构的系统误差，之后对圆弧半径进行拟合运算和误差分离，最终实现对圆弧精度的纳米级精度检测，为后续刃磨工艺的优化提供测试条件。

（1）基于 AFM 原理的金刚石刀具圆弧精度在位测量装置

由于原子力显微镜的扫描范围很小，水平 X 方向或 Y 方向 100μm 左右，纵向 Z 只有 20μm 左右，因此 AFM 扫描探针不能一次扫描就完成刀具后刀面形貌的整体检测。为了克服扫描范围的局限，可以附加超精密回转运动来辅助刀具圆弧精度的纳米检测。对于在位测量要求，金刚石刀具后刀面的超精密回转运动由刃磨机的摆轴提供，同时使用便携式的原子力显微镜 AFM 探头作为检测元件。整个在位测量装置系统由隔振基座、AFM 探头、刃磨机床摆轴、光学显微镜、三维微位移工作台、系统控制与信号采集系统和主控计算机（包括相关软件）等部分组成。AFM 探头放置在三维微位移工作台上，三维微位移工作台放置在隔振基座上，隔振基座放置在刃磨机床身上，即放置在摆轴的左侧或右侧。三维微位移工作台主要用来对正刀具刀尖，使 AFM 探头逼近刀具后刀面。

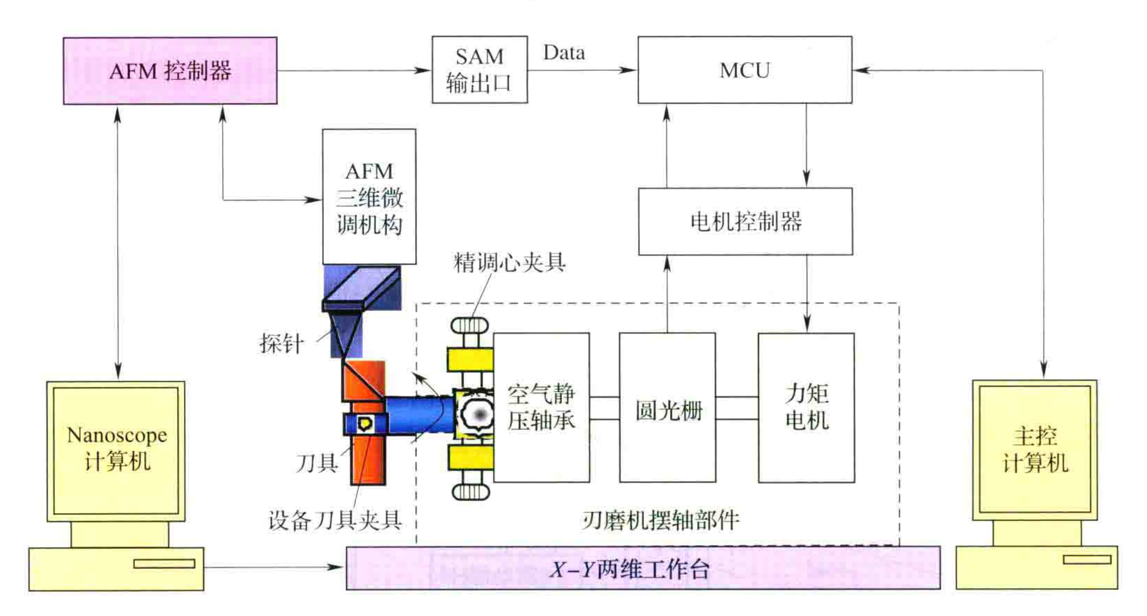


图 3-63 金刚石刀具在位检测系统原理图

（2）金刚石刀具圆弧精度的在位纳米检测技术

由于在检测过程中，金刚石刀具无需拆卸，刀具后刀面的轴线和摆轴的轴线完全重合，这样测量误差只与 AFM 的测量精度、摆轴回转精度和环境影响有关。摆轴回转误差是系统固有误差，可以通过误差分离技术从测量结果中剔除。因此通过分离摆轴回转误差，消除环境影响，凭借 AFM 的纳米级测量精度，就可以实现刀具圆弧精度的在位纳米检测。

具体操作如下：首先将刃磨好的金刚石刀具用丙酮擦洗干净，并把便携式 AFM 探头

安放于三维微位移工作台上，然后用摆轴回转运动让金刚石刀具和AFM探头对准，在光学显微镜下调整三维微位移工作台，使AFM探头聚焦于刀具后刀面，确保刀具后刀面的表面高度变化在AFM的量程范围内。其次，操作原子力显微镜控制系统，将AFM针尖逼近刀具后刀面并处于检测状态，AFM工作在Contact模式下，进行恒高扫描，摆轴带动刀具平稳转动特定的角度，并从信号处理单元（signal access module，SAM）口读出AFM针尖高度变化值。最后，主控计算机再对测得数据进行分析处理和图形显示。

（3）金刚石刀具圆弧精度的评价算法

圆的拟合是圆中心定位的关键问题之一，常用方法包括霍夫变换法和最小二乘圆拟合法。圆弧刃金刚石刀具的刀尖圆弧只占整个圆周的很小一部分，其中大部分属于短圆弧范畴，这使得数据拟合尤为困难，并且提取圆弧上的特征点存在很多噪声。因此，采取普通最小二乘圆拟合方法所得到的拟合精度不高，很难满足纳米精度测量要求。然而，待测天然金刚石刀具的刀尖圆弧半径是已设定的初始参量，即在刃磨阶段需完成的目标，因此初始设定的刀尖圆弧半径可看作刃磨好的实际刀尖圆弧半径，亦或通过体视光学显微镜粗略测得。这样就可以在最小二乘圆拟合方法的基础上，在一定范围内加入半径约束，用来约束圆的拟合过程，这就是所谓带半径约束的最小二乘圆拟合方法，将可以显著提高圆弧的拟合精度。在确定刀具圆弧中心和圆弧半径的基础上，对刀具圆弧精度进行准确评价。

第4章　超精密加工新工艺

4.1　概述

应用非球面光学透镜可以增加光学系统设计的自由度，并且在改善光学系统成像质量、提高光学性能、减小外形尺寸和重量等方面起着重要的作用。随着天文光学、空间光学等领域的发展，大口径非球面反射镜的需求量正日益剧增。

光学表面制造技术特别是大中口径光学元件的加工，由于其加工材料的脆性和光学本身对精度要求的严格性，导致了其几个世纪以来发展缓慢，并且严重依赖操作者的经验和技巧。传统的经典光学加工技术是在19世纪牛顿开发的平、球面镜加工技术基础上发展而来的，基本原理是磨具与镜面在全口径范围接触下的相对研磨和抛光，其加工效率低、加工周期长、质量不稳定，且难以加工相对孔径大于1∶2的镜面。随着光通信技术、航空航天技术、天文技术等方面的发展，非球面光学元件的需求越来越多，在微电子技术、数控技术发展的基础上发达国家从20世纪70年代开始相继发展了用数学模型描述工艺过程、以计算机数控技术为主导的先进光学制造技术，其中最具有代表性的是计算机控制光学表面成形技术（Computer Controlled Optical Surfacing，CCOS），与传统研抛加工相比其特点是材料的去除确定可控。

超精密确定量研抛加工技术也称可控柔性加工技术，其发展是以高精度、超光滑光学零件、大规模集成电路的硅片的加工需求为牵引的。其基本原理是通过控制研抛头的形状(形式)、压力、运动形式等参数，使得研抛头在单位时间内对工件表面材料的去除量及分布可知，通过控制研抛头在工件表面的运动或停留时间去除残余误差，从而达到减小工件的面形误差的过程收敛，以提高工件表面质量的目的。传统的研抛加工工艺技术（非确定性的技术）缺乏可控制参数与手段，无法建立准确模型，过多依赖于机床精度和人的经验。超精密确定量研、抛加工工艺技术这一领域的研究热点包括可控性良好的研抛新原理新方法、残余误差的定量去除算法、中高频误差控制和抑制技术等。由于高精度非球光学零件（包括大型非球面镜、高陡度非球面镜、离轴非球面镜和拼接子镜、自由曲面镜等）的加工基本上代表超精密加工技术的最高水平，超精密确定量研抛加工成为超精密加工技术发展的重点之一，国际上在这一领域的研究一直很活跃。

近年来，国内外在CCOS技术的基础上发展了一系列数控加工技术，如磁流变抛光技术(Magnetorheological Finishing，MRF)、离子束抛光技术（Ion Beam Figuring，IBF)、射流抛光技术（Fluid Jet Polishing，FJP）和气囊抛光技术（Bonnet Polishing，BP）等，其基本加工原理与CCOS技术相同，均是通过去除函数的二维卷积模型来实现确定性分布的材料去除。

自由曲面是一种复杂、不规则、非回转型的曲面，包含自由曲面光学元件的光学系统能够实现更加优异的光学性能，并且一个或少数几个自由曲面镜就能够代替较多的球面、非球面镜，从而简化光学系统结构、降低成本、减轻重量，在军事及民用行业得到了越来

越广泛的应用。光学自由曲面的加工远比普通光学球面和光学非球面加工困难，传统的基于手工的加工方法效率很低、加工精度无法保证，而且加工品种受限，这些都大大地限制了光学自由曲面的广泛应用。目前国际上主要有研抛、磨削、飞刀铣削等加工方法，还可以利用快速刀具伺服技术（Fast Tool Servo，FTS），以及慢速拖板伺服技术（Slow Slide Servo，S^3）等先进的加工方法。

此外一些高附加值的光电数码产品，也已经转向具有微结构特点的、非回转对称的复杂自由光学元件，它们是光电信息技术和光通信技术中不可缺少的关键元件。目前一些成像系统和照明系统，如平板显示器的导光板、激光打印机及扫描仪镜头、衍射光学器件、宽带光纤耦合器等已广泛使用微结构特征及自由曲面。

正是上述需求对大口径非球面光学元件、光学自由曲面以及微结构特征表面的超精密加工提出了新的要求，出现了一些新的超精密加工工艺技术。

4.2 可控柔性光学加工技术

4.2.1 可控柔性光学加工技术的特点

小磨具抛光、磁流变抛光以及应力盘抛光等技术有一个非常显著的共同点，即通过一定的方式形成合适的机械的或物理的“抛光磨具”，在被加工表面子口径范围内取得材料去除特性函数 $R(x, y)$，在整个加工表面移动 $R(x, y)$，通过计算机计算和控制驻留时间或抛光压力，以达到要求的材料去除分布。在这个过程中，由于数控（CNC）机床或数控设备是必不可少的，所以抛光过程是一个自动控制过程。事实上，这些抛光工艺过程是非常近似的，它们都是通过计算机控制“磨头”在不同位置上的驻留时间，而且有着非常相似的去除特性函数 $R(x, y)$，不同的只是“抛光磨具”的性质。显然，无需大量地刚性更换加工设备和辅助工装与工具，仅主要通过部分地调整计算机数字控制程序，即可适应不同口径的不同方程和形状的大镜加工。所以，从有别于刚性自动化的角度来说，上述光学制造技术具有典型的“柔性”特征。

可控柔性光学加工的特征还直接体现在抛光工具的“柔性”上：小磨具抛光的抛光层采用流动性较强的柔性抛光胶，甚至其基底也开始采用半刚性材料；应力抛光盘自身变形就是在计算机的控制之下，使较大尺寸的刚性抛光盘变成了实时与工件吻合的柔性盘；气囊抛光中的气囊磨具可以通过气压的改变控制其刚度和变形；离子束抛光和磁流变抛光的“抛光磨具”分别是在离子束轰击和磁流变抛光液的射流作用下产生的，其去函数都可以实时控制。

可控柔性加工技术的核心是计算机控制光学表面成形技术（Computer Controlled Optical Surfacing，CCOS），该思想由美国艾特克公司在20世纪70年代初期最先提出，并设计完成了世界上第一台计算机控制抛光机，为美国空军加工出一块 ϕ500mm，$F/3.5$ 的抛物面反射镜，面形精度为0.04μm（rms），表面粗糙度小于5nm，总加工周期为3个月。美国亚利桑那大学光学中心在美国哈勃空间望远镜计划的推动下，发展了CCOS计算机控制小尺寸磨具数控抛光技术。CCOS技术是建立在数控技术基础上的四维数控技术，即三维位置空间轨迹控制加一维时间留驻控制技术。

4.2.2 小磨具数控抛光加工技术

4.2.2.1 发展概况

小磨具数控抛光加工技术是指用比光学元件尺寸小得多的抛光工具（工具口径大约为加工件全口径的1/25～1/50），根据干涉仪等检测仪器测得的面形数据，建立加工过程的控制模型，选择合适的抛光参数，在计算机控制下通过控制磨头在工件表面的驻留时间及相对压力来控制材料的去除量，按照规划的路径加工工件表面，使其面形逐步收敛。在CCOS技术发展前期小磨头数控抛光技术甚至成为CCOS技术的代名词，小磨头数控抛光技术的发展也代表了CCOS技术的发展。

计算机控制小工具抛光技术的革命性变化在于把高级光学加工者的研抛加工工艺技巧数字化、定量化，由计算机驱动机床运动系统，控制抛光模对光学工件表面进行加工。与传统经典的加工方法相比，计算机控制小工具抛光技术研抛工具显著变小，使得其在加工各种复杂面形时和被加工表面贴合良好，有稳定的去除函数，抛光过程控制更加可靠，从而使光学元件的加工效率和加工精度得到大幅度提高。

CCOS技术问世以来，世界上以美国为首的一些发达国家相继投入了大量的人力、物力和财力进行了深入研究。比较有代表性的有美国亚利桑那大学光学中心、罗切斯特大学光学制造中心（COM）、艾特克公司、廷斯利公司、劳伦斯－利弗莫尔国家实验室、法国REOSC空间光学制造中心、俄罗斯的瓦维洛夫国家光学研究所等。CCOS技术的发展过程是随着计算机、精密测量、新工艺新材料等综合技术的发展而不断自我完善的过程。20世纪70年代初至80年代中前期，CCOS技术尚处于初始阶段，当时由于受计算机技术及精密测量技术发展的制约，CCOS还没有做到完全实用化。

R. A. 琼斯在阿斯丹（Aspden）提出的CCOS数学模型基础上，提出了用卷积迭代算法计算磨头驻留函数的模型，这一模型在以后的十几年中一直是CCOS技术最重要的理论依据之一。R. A. 琼斯对不同运动方式磨具的加工效果进行了大量研究，提出了CCOS过程中面形误差的收敛条件是磨具的工作函数曲线趋于高斯分布。要产生这样的工作曲线，磨具在自转的同时还要绕某一有一定偏心量的回转轴做公转运动，这样的运动方式直到目前为止仍为CCOS设备广泛采用。

亚利桑那大学光学中心的研究人员深入研究了CCOS用于非球面加工时材料去除量的数学模型以及研磨阶段材料的去除机理，给出了研磨阶段计算Preston方程中比例常数K的经验公式，这一公式为确定CCOS研磨阶段不同材料的相对去除量提供了指导，也为进一步建立CCOS数据库奠定了基础。

这期间法国和俄罗期也相继研制出了各自的CCOS设备，法国REOSC空间光学制造中心的计算机控制抛光机加工非球面的最大口径达2m，精度达到了$1/15\lambda$（rms），瓦维洛夫国家光学研究所的AD－1000型计算机控制抛光机的加工精度也达到了$1/18\lambda$（rms）。先进的光学加工离不开先进的检测技术，CCOS技术优越于传统手工加工的重要标志就是它有定量的检测结果作为指导。

虽然CCOS技术已取得了很大的进展，但目前还面临以下主要问题：

①工艺条件的复杂性使得实际误差收敛曲线与理论之间存在较大的差别，误差收敛的速度没有想象的快，因此如何对加工过程进行优化以提高CCOS的效率是问题的关键；

②为使CCOS技术做到真正的非专家可操作，需要建立完整的CCOS加工数据库及专家系统，而这方面目前还缺乏合理有效的数学模型；

③采用小磨头加工后表面误差的结构与传统方法加工出的表面有所不同，中、高频误差相对较大，目前虽然提出了评价该类误差的新方法，但如何将其应用到CCOS加工中去是需要解决的问题。

4.2.2.2 CCOS抛光的基本原理

通过普雷斯顿方程和线性理论推导，可以建立如式（4－1）所示一个关于材料去除量 $\Delta z(x, y)$ 的数学模型

$$\Delta z(x,y) = R(x,y)D(x,y) \tag{4-1}$$

式中：$R(x, y)$ ——抛光模运动的特征去除函数；

$D(x, y)$ ——驻留时间函数。

由式（4－1）可知，一旦知道了抛光模运动的特征去除函数和驻留时间函数，就可以通过卷积的方法计算在驻留区域内的材料去除量。而在实际抛光过程中，选择的是恰当的去除函数，通过控制驻留时间 $D(x, y)$ 来取得所要求的材料去除量，其中 $D(x, y)$ 可以通过傅里叶变换法求解，图4－1为CCOS的原理框图。

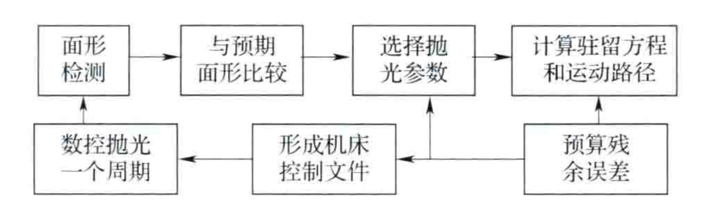


图4－1 计算机控制抛光技术的原理框图

4.2.2.3 CCOS抛光机床

计算机控制小磨具抛光机床采用数控（CNC）系统，按照所编制的加工程序自动驱动抛光磨具在工件表面上进行抛光，数控机床必须为抛光模提供需要的运动。对于口径不大于2m、相对口径也比较小的工件来说，采用 $X-Y-Z$ 三轴联动的数控运动平台即能满足要求，其中 Z 方向的移动是抛光模位置（X、Y 坐标）的随动量。在抛光模轴上安装压缩空气供给系统，使抛光模在 Z 方向在一定的范围内移动时能提供恒定的压力。这样，抛光磨具可以精确地到达非球面镜面上的任意一点并保持恒压力。在口径和相对口径很大的非球面加工中，数控机床另外还需要为抛光磨具提供绕 Y 轴的倾斜运动。所以，抛光设备的CNC系统一般需要提供 X、Y、Z 移动和绕 Y 倾斜、工件主轴转动、磨具转动以及气动加压等各种控制功能和运动，图4－2为典型的小磨具CCOS抛光设备。

4.2.2.4 CCOS工艺路线

（1）关于材料去除函数 $R(x, y)$

理想的去除函数需要具备下列特点：①是一个旋转对称的连续光滑函数；②中心具有最大去除量，函数具有单个峰值并随半径的增大而减小至零；③在最大半径以外，去除函数不具有材料去除能力；④在边缘处和中心峰值处，函数的斜率为零。平转动（有公转无自转）和行星转动方式可以取得具备以上特点的去除函数，如图4－3所示是所采用的一种抛光模结构示意图，它可以为CCOS提供平转动和行星转动两种运动方式，并通过调节转速比、偏心距及磨盘尺寸取得不同的特性曲线方程。



图 4－2　小磨具 CCOS 抛光设备

（2）关于抛光路径

在修正轴对称面形误差时，工件主轴匀速转动，抛光模在 $X-Z$ 坐标上完成二轴联动，CNC 系统控制其 X 轴上的移动和驻留。在修正非轴对称局部面形误差时，采用直角坐标控制方式，可以是从高点到高点的抛光路径。通过抛光胶层磨损和流动理论分析，更好的路径是沿镜面的等高线运动，这样可以最大程度地做到抛光模与被加工区域的曲率吻合。

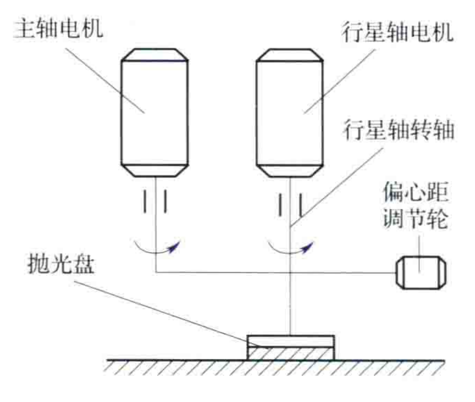


图 4－3　抛光模结构示意图

（3）关于抛光压力

磨具轴上安装气动加压系统，压缩空气由进气口输入，通过导气软管和导气环输送到抛光磨具主轴孔内，推动球头柱塞，最大行程为 20mm。抛光磨具与工件表面之间的接触实际上是保持一定压力的“悬浮”式接触，抛光模在 Z 方向 20mm 内移动时，气压系统都能产生稳定的压力。为了保险起见，还设置一个限位开关。这种加压方式方便、可靠，但压力是通过轴心向下传递，抛光模整个表面的压力分布在一定程度上是不均匀的，在用于轻质镜加工时应注意容易出现残余“印迹”。

真空吸附方法可以解决这个问题。抛光模上的小孔连接到真空泵，在抛光磨具底盘开许多小孔连通真空室和工件表面。当真空泵工作时，真空室内的空气被抽出，室内压力低于外部气压，从而使抛光模胶层吸附在工件表面上，而抛光压力就等于外界气压与真空室内气压的差值。这种方式的优点是能保证整个抛光磨具（或研磨盘）与工件接触面的压力均匀，使加工过程更接近计算机控制抛光的理论模型。

4.2.3　磁流变抛光技术

4.2.3.1　磁流变抛光机理

磁流变抛光技术（Magnerorheological Finishing，MRF）出现于20世纪90年代初期，其将电磁学与流体动力学理论相结合并应用于光学加工中。1995年美国罗切斯特大学光学制造中心（COM）利用MRF技术开始研制具有实用性、商业性的MRF光学加工设备并由美国QED公司进行商业化生产，如图4－4（a）所示，国内一些高校和研究所从21世纪初开始研究磁流变抛光技术，研制了相应的试验设备并进行了工艺研究，部分成果已在大镜加工中得到了应用，可以说国内磁流变抛光技术水平与国际先进水平相当（见图4－4（b））。



（a）美国QED公司生产　　（b）国内研制

图4－4　磁流变抛光设备

（1）磁流变效应的机理

磁流变效应，是指微米尺寸的磁化颗粒混合于某种低磁导率的液体形成的悬浮磁流变液，在不加磁场时是可流动的液体，与牛顿流体相似；而在强磁场的作用下，其流变特性发生急剧的变化，表现为类似固体的性质，撤去磁场时又恢复其流动特性的现象。在磁场作用下的磁流变效应，使磁流变液体在液态和固态之间发生的转换具有如下特性：

①转换是可逆的；

②转换是可控的；

③转换的控制仅需磁场强度信号；

④转换对控制的响应仅需毫秒级的时间；

⑤控制转换所需能耗很低。

关于磁流变效应的详细机理目前一般认为，在外磁场的作用下，分散在流体中的粒子会发生极化效应，粒子间相互作用后进一步形成呈纤维状的极化链。当无磁场作用时，粒子悬浮于母液中呈随机分布。施加磁场作用后，粒子表面出现极化现象，形成偶极子。偶极子克服热运动作用而沿磁场方向结成链状结构，一条极化链中各相邻粒子间的吸引力随外加磁场强度的增强而增加。当磁场增至一临界值时，偶极子相互作用超过热运动，使粒子热运动受缚，此时，流变体便呈现固体特性。磁流变体的屈服应力值随外加磁场强度的增加而线性增加，但当达到某一饱和值后，如果再增加磁场强度，磁流变体的力学性质便会基本不变，即达到了饱和磁场下的动态屈服应力。

（2）磁流变抛光工艺机理分析

磁流变抛光技术是利用磁流变抛光液在磁场中的流变性对工件进行抛光，其原理如图4－5所示。磁流变液由抛光轮循环带入抛光区域中，在该区域里，磁流变抛光液在高强度的梯度磁场的作用下，成为具有黏塑性的 Bingham 介质，变硬，黏度变大，形成具有一定形状的“柔性抛光模”（磁流变抛光液在磁场中形成的凸起缎带），当“柔性抛光模”流经工件与运动盘形成的小间隙时，工件表面会产生很大的剪切力，对工件表面材料实现去除。“柔性抛光模”的形状和硬度可以由磁场实时控制，而影响抛光区稳定性的其他因素都固定不变。这样既能通过改变磁场来控制抛光区的大小和形状，又能确保在一定磁场强度下抛光区的稳定性，从而对加工表面进行定量修整。当加工非球面零件时，通过对被加工表面的误差结构进行分析，可以计算出工件各局部区域的驻留时间，进而控制“柔性抛光模”在工件上的位置，达到定量修整表面误差的目的，提高加工表面的形状精度。

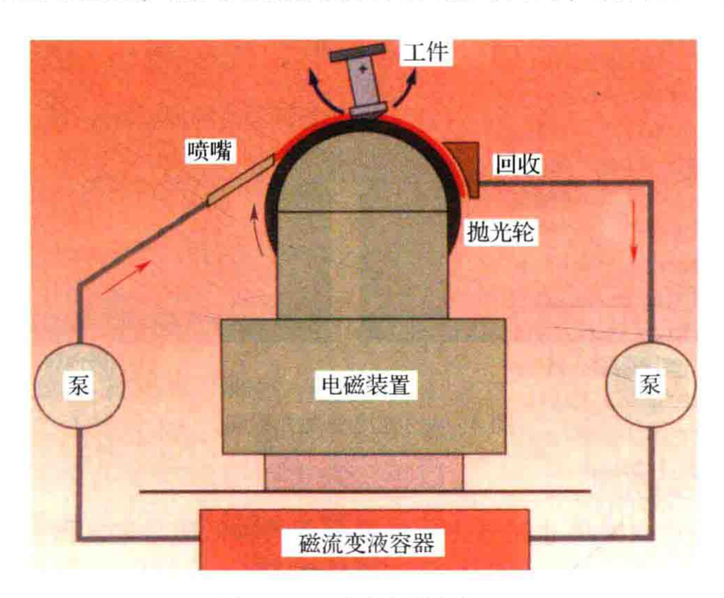


图4－5　磁流变抛光机理

磁流变抛光方法，可以认为是以磁流变抛光液在磁场作用下，在抛光区范围内形成的具有一定硬度的“小磨头”代替散粒磨料抛光过程中的抛光盘。在磁场的作用下，磁流变抛光液变硬，黏度变大，并且“小磨头”的形状和硬度可以由磁场实时控制，而影响抛光区稳定性的其他因素都固定不变。这样既能通过控制磁场来控制抛光区的大小和形状，又能确保在一定磁场强度下抛光区的稳定性。这些优点是传统的抛光盘所无法比拟的。

4.2.3.2　磁流变抛光特点

确定性磁流变抛光提供了一种可以准确控制去除量的确定性抛光方法，它具有以下优点：

①能够获得质量很高的光学表面。由于磁流变抛光液的流变可控制性，通过控制电磁场的强度，可以调节磁流变液固相状态下的屈服应力的大小，这样就有利于产生微小切削作用，实现微米级甚至纳米级的材料去除加工，因此能够获得较好的光学零件表面粗糙度。由于抛光是由“柔性抛光模”进行的，工件表面层和次表面层不会产生内部应力，因而工件不会造成表面或亚表面损伤，易于得到较高的光学表面质量。

②易于实现计算机控制。磁流变抛光技术是一种确定性光学加工技术，通过控制磁场，可以控制“柔性抛光模”的大小、形状及强度，在工艺参数恒定的条件下，材料去除率基本保持不变，从而避免了传统抛光中由于抛光盘的磨损造成材料去除率的改变。最后根据材料去除模型进行计算机控制，实现各种面形的光学零件加工。

③去除效率高。由于在磁流变液中加入了微细磨料，在可控磁场的作用下，通过控制磁场的形状和强度，磁流变液相当于形成一个类固态的“柔性抛光模”，抛光磨粒在磁场形成的高压区内被挤在“柔性抛光模”表面对工件材料进行剪切去除，由于“柔性抛光模”与工件间具有很高的相对速度且磁流变液在磁场的作用下发生磁流变效应能产生很大的剪切屈服应力，所以能对工件实现高速去除。

此外，磁流变抛光还能够避免振动、磨粒磨损以及边缘效应等传统抛光方法的缺陷。

4.2.3.3　磁流变抛光液的性能

在磁流变抛光过程中，磁流变液起着极其重要的作用，它不仅要能够在电磁场的作用下及时而准确地发生固、液相的相互转化，而且还起着承载抛光颗粒，实现对光学玻璃表面进行机械、化学综合去除的作用。因此磁流液的性能的好坏直接关系着光学玻璃的抛光效果。

（1）表征磁流变液性能的参数指标

①零场黏度：即不加磁场时流体的黏度。磁流变液越低越好，只有这样才能使得磁流变液在未加磁场时具有很好的流动性，便于输送和回收，而在加上磁场后能迅速变为一定硬度的固相，使磁流变液表现较大的固相范围。

②静态屈服应力：即在一定的磁场强度下不发生流动时所能承受的最大剪切应力。静态屈服应力是表征磁流体在磁场下固化程度的重要指标。

③动态屈服应力：即在一定的磁场强度下随剪切速率变化而变化的磁流体的剪切应力。动态屈服应力是决定了磁流变抛光过程中剪切应力的上限，从而磁流变液动态屈服应力的大小一定程度上决定了磁流变液的抛光效率。

④磁流变效应的可逆性：要求磁流变液必须有磁化和退磁两种可能，并且磁滞回线尽可能窄，剩磁小。

⑤饱和磁化度：为使同样浓度的磁流变液产生更强的屈服应力，具有更高的去除效率，要求其饱和磁化度尽可能大。

⑥具有能耗低，无毒，不挥发，无异味、杂质干扰小、温度使用范围宽以及响应速度快等特征。

以上指标都是以粉末颗粒均匀分散的磁流变液为基础，为此研究磁流变液的稳定性原理同时兼顾其他性能，合理选择与配比磁流变液的成分，是配好磁流变液的关键所在。

（2）磁流变液性能分析

磁流变液是将非磁性的抛光粉和磁性颗粒均匀的分散于基载液中而制成的抛光液，因此磁流变的基本组成应为磁性颗粒、基载液、抛光粉、稳定剂、其他添加剂等。

磁性颗粒主要决定磁流变液的屈服应力和磁流变效应，为满足磁流变抛光要求，其应具备高磁导率、低磁矫顽力、磁滞回线狭窄、颗粒体积适当，微米级羰基铁粉能够很好地满足以上要求。

基载液也是关键因素，影响磁流变液诸多性能。基载液分水基和油基两种，对不同应

用有不同的选择，对光学元件抛光，要求基载液应具有：①高沸点、低黏度；②适当的黏度；③化学稳定性好、耐腐蚀、无毒、无异味、价格低廉等特征。水除上述性能优越外，对玻璃也有一定的化学侵蚀作用，有助于光学元件的加工，所以选择水基更合适。

抛光剂可以根据不同的工件材料选择金刚石、CeO_2、氧化铝等，而稳定剂主要是使固体颗粒均匀分散基液中，主要选用活性剂和增黏剂等，其他添加剂主要作用是提高磁流变液的防锈、耐腐蚀等性能。

4.2.3.4 磁流变抛光工艺

无论从初始的普雷斯顿方程还是后续从中推导出来的去除函数模型来看，磁流变抛光中材料去除效率主要与抛光轮的磁场强度 H、抛光轮的线速度 U、抛光轮与工件之间的间隙 h、磁流变抛光液性能等这几个因素有关。随着磁场强度的增强，抛光轮线速度的增加以及抛光轮与工件之间的间隙减小，材料去除效率均会增加。其中抛光轮的磁场强度 H 以及抛光轮的线速度 U 是设备参数，而抛光轮与工件之间的间隙 h 是加工中要根据不同加工阶段进行合适调整的。

（1）浸入深度（抛光轮与工件间隙）对抛光效率以及元件表面粗糙度的影响

浸入深度是指被加工元件表面进入缎带内部的深度，随着浸入深度的增加（抛光轮与工件之间的间隙 h 减小），抛光液与元件的接触面积变大，抛光斑的尺寸也变大。相应的材料去除效率（峰值去除率和体积去除率）均增加，加工后元件表面的粗糙度也随浸入深度的增加而增加。对应普雷斯顿方程，当浸深增加，抛光间隙 h 减小，抛光区域的流体动压力 p 相应增加，机械磨削增强，材料去除率变大；同时由于机械磨削作用的增强，元件表面的粗糙度也增加。加工中，在初期的阶段属于大面积修面形，材料去除量大，可以采用较大的浸深，提高加工的效率；后续面形接近预定值时材料去除量减少，为了保证好的表面粗糙度就可以采用较小的浸深，精修面形。

（2）抛光轮转速对抛光效率及元件表面粗糙度的影响

抛光轮的转速直接影响抛光区域“小磨头”与工件的相对速度 v，抛光轮的转速增加会影响材料去除率和被加工元件表面的粗糙度。

抛光轮的速度增加时，峰值去除率确实增加，但是由于转速增加时缎带变窄，导致抛光斑变小，故体积去除率降低。v 增加时抛光区域机械磨削作用增强，那么峰值去除效率增加，被加工元件表面粗糙度变差。实际加工中，我们抛光轮的转速不能过低或过高，过低时单位时间通过抛光区域的抛光液变多容易造成堵塞使抛光区域压力不均匀；过高时会导致缎带不连续造成去除函数不稳定。

（3）抛光液浓度对抛光效率及元件表面粗糙度的影响

传统的抛光工艺中，抛光液中水分质量占比对元件材料的去除效率以及被加工元件表面粗糙度有一定的影响。水的存在以及由抛光粉对于玻璃表面产生的应力能显著地降低材料的断裂韧度以及加速整个动力学过程，这对于水在抛光中增加材料的去除量是一个可能的解释。可见传统抛光工艺中，玻璃的水解作用也是一个较为重要的材料去除因素。

通过观察磁流变抛光的试验结果发现，磁流变液中水分质量分数的变化，也引起了材料去除率的变化。但区别于传统抛光工艺的是，这里磁流变抛光液中水分质量分数的增加却导致材料去除效率的降低，这是因为随着水分的增加使得磁流变液黏度变低，在“小磨头”作用区域的流体动压力也相应的减小，导致抛光颗粒的机械磨削作用减弱，材料

的去除率也会降低，同时由于机械磨削的减弱元件表面的粗糙度就会相应变小，从这一点上也能很好地说明 MRF 加工中材料的去除机理主要还是机械磨削。从试验的结果来看，MRF 抛光中磁流变液水分质量分数对去除效率和表面粗糙度的影响相对较大，所以在日常加工中就要求控制好机床的补水频率，确保水分质量分数的稳定，这样才能使得加工中的去除函数稳定，保证最终的加工精度。

4.2.4　应力盘抛光技术

4.2.4.1　应力盘抛光技术的发展

CCOS 小磨具抛光技术最显著的缺点是所采用的磨盘尺寸太小，加工效率不高，且容易产生表面中高频误差。这种面形误差造成的波前误差很难用现代的主动光学或自适应光学技术来修正，会影响光学系统的成像质量和能量集中度。随着需求的发展，非球面镜的口径越来越大，并且陡度也越来越高，为了更好地贴合镜面，磨盘的尺寸并不能随镜面口径的增大而增大，因此其加工效率不高的劣势就更加明显。

为了提高大口径非球面镜的加工效率，美国亚利桑那大学斯迪瓦天文台大镜实验室于 20 世纪 90 年代初提出了一种基于薄板弹性变形理论的计算机控制变形大口径磨盘——应力盘（Stressed Lap），并发展了相应的计算机数控应力盘研磨、抛光技术，如图 4 - 6 所示。其采用大尺寸磨盘（直径约为被加工主镜的 1/5 ~ 1/3），在周边可变应力的作用下，磨盘的面形可以实时地变成所需要的二次离轴非球面，实现在非球面加工过程中不同位置处的吻合研磨和抛光。由于应力盘加工技术采用大口径高刚度的磨盘，因而在主镜的研磨过程中具有优先去除表面最高点或最高区域的特点，其平滑效果好，加工效率高。



图 4 - 6　美国亚利桑那大学应力盘抛光 MMT 镜加工现场

英国伦敦大学光学科学实验室在此应力盘技术基础上开发了一种对磨具的不同部位施以动态变化压力的全口径大镜加工方法。

与小磨具 CCOS 技术相比，应力盘抛光技术是一种更新的技术，它利用主动变形技术，使抛光盘在对非球面光学表面进行抛光的过程中，通过计算机控制实时改变抛光盘的形状，使其符合理论非球面面形，进而将被加工球面向标准非球面修正，也有人称应力抛

光技术是一种子口径抛光技术（Subaperture Polishing Lap）。传统的研抛盘用聚四氟乙稀、沥清、松香等有一定柔性的介质，但这类研抛盘在加工过程中其柔性是不可控的，而应力盘抛光技术可以通过计算机控制改变研抛盘的形状，因此也可被称为可控柔性加工技术。

美国亚利桑那大学斯迪瓦天文台大镜实验室利用应力盘抛光技术先后加工了从 1.2m 到 8.4m 直径的十余件大型反射镜，精度达到了 20nm（rms）。进入 21 世纪后，该实验室将应力盘技术应用于离轴非球面的加工，并成功地完成了新太阳望远镜（New Solar Telescope，NST）的主镜加工，如图 4-7 所示。NST 的主镜为一块口径为 1.7m、离轴量为 1.84m 的离轴抛物面镜，其面形加工精度达到 21nm（rms）。目前，该实验室正在加工的大麦哲伦望远镜（Giant Magellan Telescope，GMT）主镜由 6 块 8.4m 离轴子镜和一块 8.4m 轴对称子镜构成，相对孔径为 F/0.7，其中离轴子镜的离轴量达到 8.71m，预计加工精度 21nm（rms）。上述成果表明应力盘加工技术是一种很好的加工大口径非球面的方法，其应用前景十分诱人。



(a) NST 离轴镜加工



(b) GMT 离轴子镜加工

图 4-7　应力盘用于离轴非球面镜的加工

在美国亚利桑那大学斯迪瓦天文台大镜实验室对直径 6.5m、相对口径为 F/1.25 的多镜面望远镜（Multiple Mirror Telescope，MMT）主镜用应力盘抛光过程中是先用金刚石刀具加工出一个非球面，然后进行抛光，最终的面形误差为 23nm（rms），参见图 4-8。

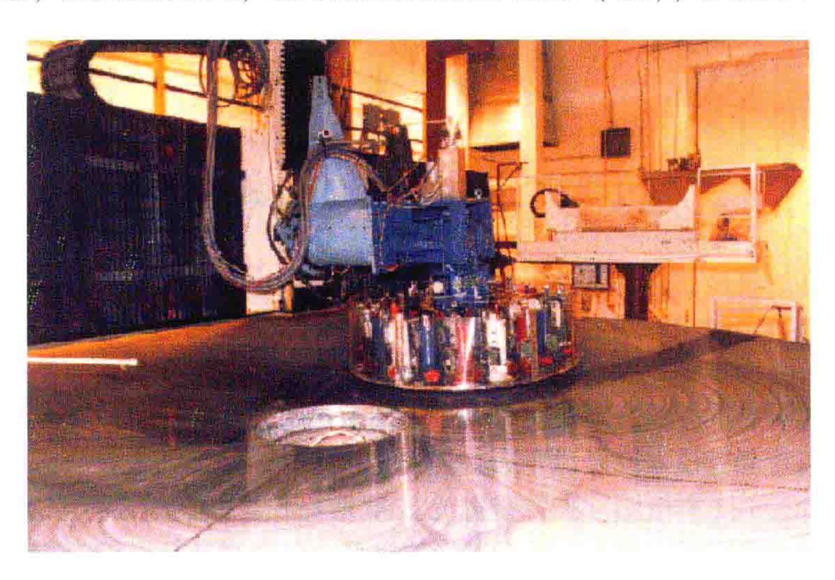


图 4-8　美国亚利桑那大学斯迪瓦天文台大镜实验室应力盘抛光 MMT 主镜

4.2.4.2　应力盘抛光原理

应力盘抛光的工艺流程与小磨具 CCOS 抛光有相似之处（参见图 4－1），分为四个步骤：第一步是利用面形测量仪器（如三坐标测量机、激光干涉仪等）测得工件表面的面形误差数据；第二步是将面形误差数据作为目标值输入到应力磨盘材料研抛量理论仿真模型，通过仿真计算来得到最优加工结果时的系统控制参数，如工件转速、磨盘转速、磨盘沿工件径向移动速度以及磨盘对镜面施加的压力等；第三步是根据数控机床的规范将需要控制的参数转换成对应的数控指令来实现；第四步是进行实际的抛光加工。加工完成之后若面形精度未满足要求则按照上述流程继续进行下一轮的加工。由于材料研抛仿真模型存在一定的误差，应力磨盘的单次加工并不能完全去除所有的面形误差，因此需要经过多次迭代加工来使面形误差逐步收敛到目标值。

应力磨盘在通常的加工过程中，由机床的主轴带动被加工工件以 ω_1 的速度转动，磨盘在磨盘轴的驱动下以 ω_2 的速度转动，磨盘按加工程序指定的速度分布沿工件径向来回移动。磨头轴还随着磨盘的运动上下移动并产生小角度偏摆，使其轴向与工件被加工区域的法线方向重合，使磨盘与工件实现更好的吻合，如图 4－9 所示为能动盘研磨抛光过程示意图。

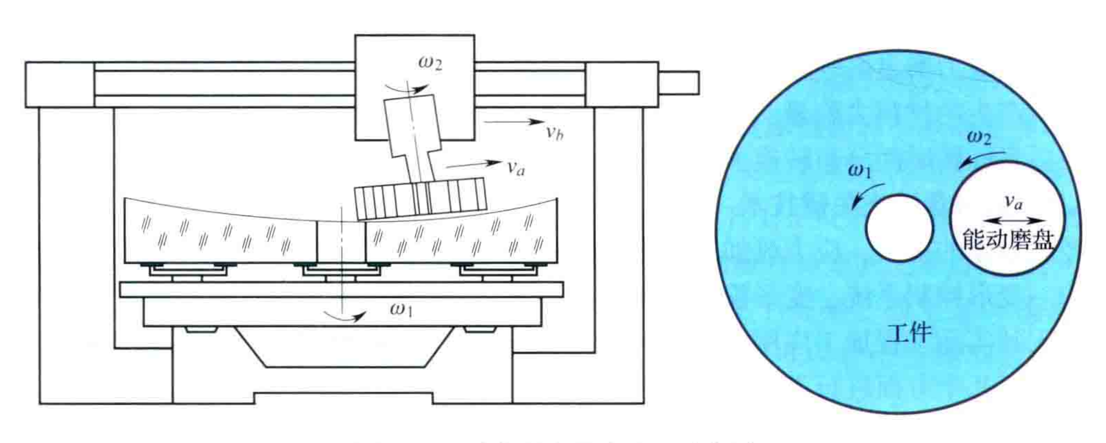


图 4－9　动盘研磨抛光过程示意图

从图 4－9 可以看到，在应力盘抛光加工过程中，若被加工件是回转对称非球面，则除了磨盘位于中心点外，其余情况下磨盘所覆盖的区域均为离轴非球面；若被加工工件时离轴非球面，则在任何位置处磨盘所覆盖的区域都是离轴非球面，且离轴量比加工回转对称非球面时更大。并且在加工过程中，磨盘自身还要旋转，因此在磨盘坐标系下，磨盘底面所要吻合的是不断旋转的离轴非球面，这就需要能动磨盘具有实时改变其面形的能力。

图 4－10 为应力盘典型结构示意图，总共有 18 个力驱动器排布在能动盘基板的外边缘，每 3 个等角间距分布的力驱动器两两之间通过弹性钢绳相互连成一组，共有 6 组，通过力驱动器拉动钢绳来施加拉力，为磨盘的变形提供所需的力和力矩。应力盘上有 3 组减重机构，通过闭环控制每组的提升力来改变磨盘对镜面所试加的压力和压力分布。

对于机床来说，应力盘既是一个组成部件（工具），同时又是一个相对独立的变形系统，它们之间存在着复杂的通信关系：应力盘变形时需要获取盘所处的位置和转动的角度数据，这些数据将从安装在传动链中的编码器中直接实时提取。盘载驱动器工作时，信号线及电源线必须由静态的固定接口转换和传递到动态的“盘载系统”上，为此导电环是必要的。

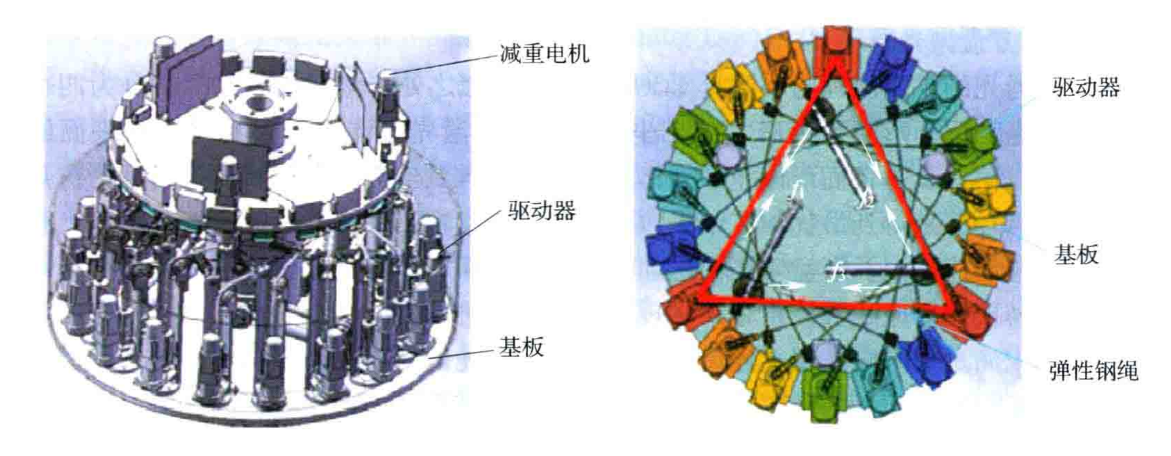


图4-10 能动盘结构示意图

目前应力盘抛光加工技术主要采用旋转对称加工方式，根据磨盘与工件之间的相对运动规律，将磨盘与工件接触面上的压强分布简化为均匀分布，然后基于普雷斯顿方程建立描述应力盘材料研抛量的数学模型。在旋转对称加工模式中只需要控制磨盘在工件径向各位置处的环带驻留时间。其具体步骤为：根据所要去除的材料去除量在工件径向上的分布情况来规划应力磨盘的驻留位置，通过材料磨削量数学模型来计算磨盘在各位置处驻留单位时间所产生的材料去除量，然后利用非负最小二乘法来计算磨盘在这些位置处的驻留时间，最后将驻留时间分布转换为磨盘的移动速度来控制机床进行相应的加工。

4.2.4.3 应力盘抛光关键技术

经过多年的发展，应力盘加工技术的探索已完成，在机床结构及数控系统，应力盘机械结构、变形控制系统、变形检测系统，以及加工工艺规范等方面已逐步完善，并从探索研究走入到实际工程加工应用中。但为了满足任意二次非球面的高效、高精度加工需求，还需在以下几个方面进行深入的研究。

（1）应力盘变形控制技术

随着应用需求以及相关技术的发展，二次非球面和离轴非球面的应用将逐渐增多，被加工光学元件的形状越来越复杂。这就对应力盘变形控制技术提出了越来越严格的要求。为了满足大口径任意二次非球面的加工需求，就需要使应力磨盘具有加工任意二次非球面的能力。首先需要从理论上推导计算得到应力磨盘加工任意二次非球面时磨盘底面所需的实时变形，因为有了这个数据之后才能根据应力磨盘的驱动器变形影响函数计算出其在加工任意二次非球面时力驱动器所需输出的动态力，从而保证加工过程磨盘能够实时变形到与工件表面相吻合。

（2）磨盘与工件间的压强分布规律

应力盘的抛光加工模型是建立在光学加工领域普遍采用的描述材料磨削规律的普雷斯顿方程之上

$$\Delta z(x,y)=k\cdot p(x,y)\cdot v(x,y) \tag{4-2}$$

式中：$\Delta z(x,y)$——磨盘与工件接触区域中某一点(x,y)在单位时间内的材料去除量；

$p(x,y)$——点(x,y)处磨盘对工件表面施加的压强；

$v(x,y)$——点(x,y)处磨盘与工件单位的相对运动速度；

k——普雷斯顿常数，与加工过程中的温度、磨料、磨盘和工件材料等有关。

如式（4－2）所示方程表明在加工过程中，工件表面材料的宏观去除效率与磨盘工件间的压强和相对速度大小是成正比的。相对速度可以根据运动规律推导得出，但目前在建立应力磨盘的材料去除数学模型时，只是将磨盘位于工件内部时的压强分布简化为均匀压强分布，特别是当磨盘部分悬空于工件外边缘处时的压强分布更需要进一步研究其准确分布才能提高应力盘的抛光精度。

（3）能动磨盘的材料去除函数

在 CCOS 技术中，磨盘的材料去除函数或称为工具的影响函数（Tool Influence Function，TIF）都是至关重要的。在典型 CCOS 技术中，磨盘的材料去除函数定义为磨盘在工件某一点驻留单位时间所造成的材料去除量的分布函数。而在应力磨盘加工中，由于工件自身要旋转，因此其材料去除函数定义为磨盘在工件某一环带驻留单位时间所造成的材料去除量的分布，其为一旋转对称的圆环状分布，称为环带材料去除函数。在确定性加工中，材料去除函数随加工时间的稳定性、分布形状以及与数学模型所预测的理论去除函数的一致性，都对最终的面形加工精度影响很大。

（4）应力盘抛光加工的边缘效应

当应力盘运动到工件边缘处磨盘部分悬空时，由于支撑条件的改变，工件的边缘相当于支撑磨盘的支点，磨盘悬空部分在重力的作用下会对边缘产生很大的力矩作用，使得边缘处接触面上的压强成非线性上升，而现有的模型对这一现象描述的不准确使得磨盘在边缘处的实际材料去除量远远大于模型预测值，从而出现加工过程中工件塌边的现象即边缘效应。如图 4－11 所示为应力盘在研磨加工一块 1.8m、F/1.5 反射主镜时产生的边缘塌边现象。图 4－11 中面形误差数据是由三坐标测量机沿镜面直径方向测量得到的，共测量 8 条过直径的轮廓线，每条线的数据沿 y 轴平移分开以便于观察。横坐标为镜面坐标，单位为 mm，纵坐标为镜面面形误差，单位为 μm。从图中可以看出主镜的边缘一周均产生5～10μm 左右的塌边。一旦出现塌边后就需要将整个镜面向下去除来修正面形，这将会严重影响加工效率。另一方面，对用于拼接的离轴子镜而言，边缘面形的好坏尤为重要。

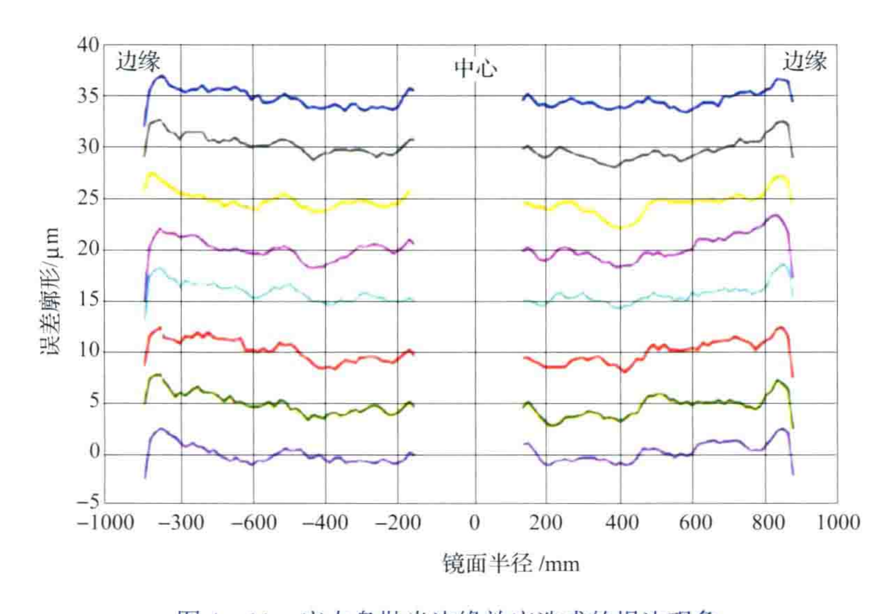


图 4－11　应力盘抛光边缘效应造成的塌边现象

（5）应力盘非回转对称面形误差的修整

在实际的应力盘回转对称加工过程中，由于多种因素（如镜面铣磨误差、研磨抛光磨料磨损、磨料分布均匀等）的影响，镜面会残留下非回转对称的面形误差，如像散误差或更高阶的局部面形误差，这些误差很难用回转对称的加工方式来去除，目前主要还得依靠小磨头 CCOS 抛光、数控机械手以及人工修除的方式来去除这样的面形误差，不仅效率低，而且容易产生中高频面形误差。

另一方面，在加工小口径离轴非球面时，可以利用应力盘直接将镜面从最接近球面研磨到离轴非球面，此时所需的材料去除量是非回转对称的，为了实现这一功能就要求能动盘具备非回转对称去除加工材料的能力。

4.2.4.4 应力盘抛光的技术路线

应力盘以圆形薄平板作为基底，在平板上粘一层聚四氟乙烯，聚四氟乙烯表面磨削成与工件中心曲率半径一样的球面。在细磨时贴上金刚石丸片或金属片，在抛光时则用沥青层。一般取应力盘口径为工件口径的 1/5 ~ 1/3。

应力盘加工与检测一般为以下流程：

①小型金刚石砂轮数控铣磨表面成形。用机械探针法测量表面形状，加工精度的均方根值为 5μm。

②计算机控制应力盘加散粒磨料细磨，盘面采用加贴锌片或铝片。采用激光干涉仪测量面形，加工精度的均方根值为 0. 5μm。

③计算机控制应力盘抛光。采用激光干涉仪和非球面补偿器构成零检验光路，加工精度的均方根值要求达到 0. 05 ~ 0. 02μm。显然，每道加工工序面形精度较前道工序大约提高了一个数量级。

应力盘加工过程的运动规范是主轴带动被加工件转动，应力盘在磨头轴驱动下相对工件转动，同时由被加工件的顶点起始向工件边缘平移，从而抛光到整个加工表面，计算机控制磨头在各环带的运动速度和驻留时间。应力盘在加工过程中能动地改变自身的表面形状，与所在位置的离轴非球面适配。

在对某一方程的非球面光学镜进行加工前，较长时期的应力盘变形模拟试验是必须的，模拟过程中积累的经验数据用来修正理论数据库。在这个过程中，盘面面形检测是非常重要的，检测台由 61 个分布在全口径范围内的位移传感器组成，这些传感器的量程是 10mm，精度为 1μm。

4.2.5 进动式气囊抛光技术

4.2.5.1 概述

进动气囊抛光是 20 世纪 90 年代由英国伦敦大学光学科学实验室提出的新型光学抛光方法，是一种将传统的光学抛光工艺与现代数控技术相结合而形成的新颖光学加工技术。在进动抛光过程中，抛光头除了绕着自身轴线旋转，同时还绕气囊与工件接触区法线方向旋转，这种运动方式类似陀螺的旋转，称之为“进动”。采用这种加工方式，可实现“点区域”的抛光加工，而且加工效率高，表面质量好，精度高，在光学元件特别是复杂光学元件的加工中具有广阔的前景。结合气囊的抛光压力和接触区域的可控性，使得这种抛光方法适合平面、球面、非球面甚至自由曲面的加工。

进动气囊抛光是一个复杂的过程，这种“进动”相对于典型的旋转抛光头的结构有很多优点：

①抛光工具与工件的吻合性好：在抛光非球面等曲率变化的曲面时，抛光工具与工件表面的紧密吻合是保证抛光质量的基本条件，气囊抛光采用的抛光工具为柔性的气囊，在抛光过程中，抛光工具与工件表面完全吻合，在局部接触区内抛光模和工件的面形一致，使所有的局部抛光区的去除函数都相同，对于提高表面粗糙度、控制面形精度十分重要。

②局部抛光区内材料去除均匀：气囊抛光采用了一种类似陀螺的“进动”运动，抛光时气囊抛光头的旋转轴线与工件局部高速旋转。由此，抛光区域在不同的方向得到了均匀一致的抛光，不但获得了高斯型的去除函数，而且抛光的划痕也得到了平滑，因此有利于气囊抛光材料的数值优化和保证整个加工的质量。

③研抛工具与工件的接触面积以及研抛工具与工件接触面的接触压力独立可控，有利于控制表面形貌和纹理误差。

目前国外在进动气囊抛光技术的研究方面取得了可喜的成果。自从英国伦敦大学光学科学实验室提出进动抛光技术后，在UK粒子物理、天文学研究委员会和工商界的资助下，开展了气囊抛光理论与技术的研究，并与Zeeko公司合作开发了IRP系列气囊抛光机床，例如IRP－200、IRP－300直至IRP－2300，抛光光学镜面的最大直径可达2300mm，气囊抛光工具最大直径为800mm，抛光接触区直径可达240mm。气囊抛光技术已被成功应用于欧洲极大望远镜（E－ELT）工程，E－ELT主镜直径为39.3m，由798块跨径为1.4m的六边形镜片组成，所有都是离轴非球面。采用Zeeko IRP－1600进行加工，并采用误差在位测量及补偿系统，如图4－12所示，最终镜片的加工精度达到16.8nm（rms）。




图4－12 E－ELT镜片的气囊抛光（IRP－1600）

4.2.5.2 进动式气囊抛光的原理

（1）进动气囊抛光运动基本原理

进动气囊抛光方法是采用特殊的抛光结构和独特的运动原理，用一个尺寸比被加工元件小得多的球形抛光气囊，气囊为球形的柔性膜，外表面粘贴聚氨酯抛光垫，装于旋转的工作部件上，形成封闭的腔体，内部充入低压气体。抛光时，其旋转轴与工件表面局部法线成一角度，由气囊抛光头凸起的一个侧面与工件表面接触，避免了传统同轴旋转抛光中心速度为零的缺点，气囊式抛光原理如图4－13所示。

N 为垂直于工件局部表面的法线，P 是气囊旋转轴，加工工件上某点时，气囊旋转轴绕工件表面某点局部法线以一定的角度连续旋转，当气囊旋转轴 P 移动时，其绕法线 N 保持角 α 恒定“进动”，在空间扫过一个圆锥面的轨迹，理论上讲，工件在各个方向上可被均匀抛光，从而获得无明显抛光擦痕方向的高精度表面，零件自身也能旋转，而抛光头高速旋转可获得较高的去除率。气囊内部的充气压力、抛光接触区、进动运动、旋转速度等变量是可以独立控制的，在计算机的控制下，以一定路径、速度和压力抛光工件表面，抛光气囊随旋转工作部件而旋转，通过抛光液的作用，达到抛光玻璃表面的目的。

这种“进动”相对于一般的旋转抛光头的结构有很多优点，如图 4－14 所示的是旋转抛光与“进动”抛光的痕迹比较，可以看出，“进动”抛光的工件表面可以在不同方向得以研磨，能够产生较高的表面纹理而没有方向上的影响，去除函数中心去除量不为零且没有空间高频分量；抛光过程中能够得到较高的材料去除率，材料去除率可以通过抛光头压力和抛光速度进行控制。这种抛光压力和接触面积的连续变化的能力，决定了机床抛光球面和非球面的能力。气囊式抛光可实现的加工表面范围十分广泛，可加工任意自由曲面。

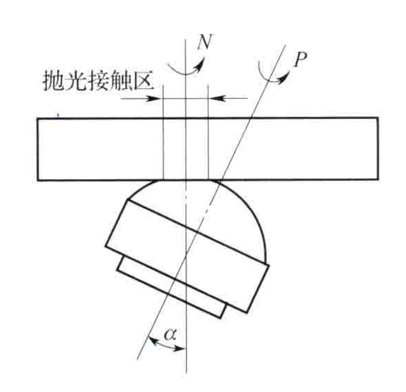


图 4－13　气囊抛光原理图

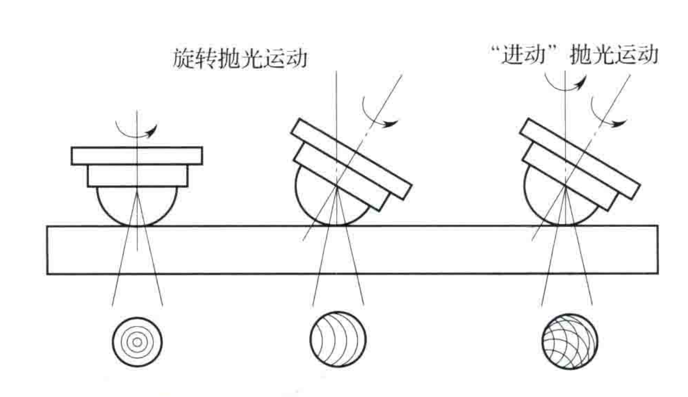


图 4－14　旋转抛光与进动抛光轨迹比较

（2）气囊抛光接触区域的影响因素

气囊抛光头和被加工工件表面之间的相互作用有如下特点：

①接触面积小，与接触点的相对曲率半径相比，气囊抛光头与工件表面在接触点的接触区域半径相对较小；

②接触应力集中，接触区域一般都是从点接触扩展到面接触，作用载荷均集中在较小的接触区域；

③接触应力及接触变形均呈现非线性变化规律，非球面表面曲率以及抛光头位置的变化，引起接触区压力和面积改变，进而导致接触区应力及接触区位移相对于抛光力呈现非线性规律变化。

抛光接触区域是由通过控制工件表面与气囊球心之间的相对位置及改变气囊压缩量得到的。从定量材料去除角度来看，需要抛光接触区域的尺寸和形状在抛光时始终保持不变，这样有利于计算机对工件材料去除率的数字优化、实现自动化加工。气囊作为抛光工具，所形成的抛光接触区的变化较大；大小不同特性不同的气囊，形成的接触区的形状也不同。对抛光接触区的影响因素加以控制可以提高抛光效果。

在气囊抛光中，气囊对工件的相对压缩产生了气囊对工件的压力，气囊的压缩运动不仅形成了抛光接触区域，而且形成了接触区域的压力，气囊的压缩量决定了抛光接触区压力的大小。气囊内部压力的不同，得到的压缩量也不同，在同等的压缩量下，改变气囊的充气压力大小相当于在抛光接触区域尺寸近似不变的情况下，改变了工件和气囊间的压力。当气囊抛光的进动角改变时，抛光接触区内的速度大小也随之改变，工件接触表面和气囊之间的接触区也随之变化。依据抛光原理与抛光的运动特点加以分析，充气压力、压缩量和进动角是影响抛光接触区域的主要因素，决定了工件的抛光质量。

气囊抛光工具的压缩量对有效抛光接触区域大小的影响非常大。伴随着气囊抛光工具压缩量的增加，有效抛光区域的大小也会增大。并且即使是相同的气囊，在不同的进动角度下对压缩区域的影响也是不同的。

影响接触区域的因素还有气囊主轴转速、进动速度、抛光液中抛光介质的浓度、抛光液流速等，这些因素或多或少都会对最后的抛光结果造成影响，在实际加工试验中需要对这些因素予以分析，总结影响的主要因素，忽略次要因素，控制各工艺参数及驻留时间，获得需要的面形。

4.2.5.3 进动式气囊抛光工艺试验

（1）气囊抛光工具

进动气囊抛光技术中，作为抛光工具的气囊采用预定形的球形柔性薄膜，气囊本身具有一定的弹性，在有一定的压缩量的条件下产生压力，必要时还可通入气体以调节压力。通过调节抛光头与被加工工件的相对位置可以控制抛光头与工件表面的接触面积，从而得到确定性的去除函数模型。

由于抛光头与被加工工件接触面积大小连续可控，不需要更换不同直径的抛光工具即可以实现抛光全过程加工，减少加工准备时间，提高加工效率，降低加工成本，避免因更换抛光工具引起的加工误差。这样在抛光头压力、抛光接触面积完全可控的条件下，可以快速、准确地控制材料去除率，实现抛光、修形的全过程加工。气囊是气囊抛光工艺过程中必不可少的关键部件，气囊本身材质、结构特性以及气囊包覆层的厚度等参数都对抛光质量有重要影响。

英国伦敦大学光学科学实验室和Zeeko公司合作开发的气囊抛光工具，如图4－15所示，更换不同的工具直径，配合特定的抛光液即可用于研抛光学器件表面，获得不同的接触尺寸。气囊作为一种柔性抛光工具，其结构由三部分组成：骨架层（基体）、加强层和抛光膜。骨架层要求具有一定的硬度和弹性，主要是维持抛光头的基本形状，而在作用一定

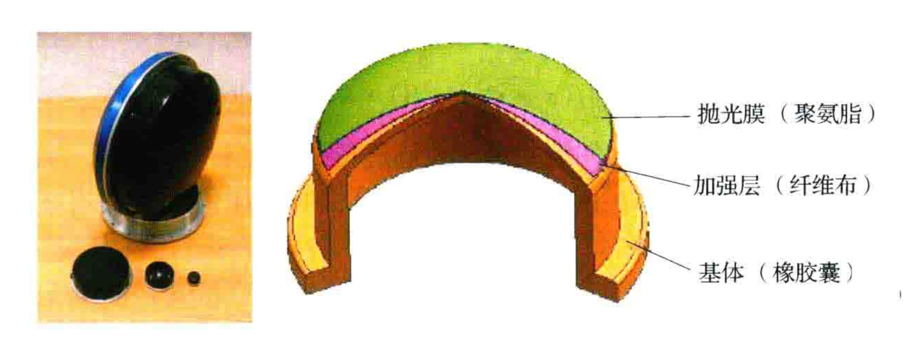


图4－15 英国伦敦大学光学科学实验室FoZeeko公司合作开发的不同规格的气囊抛光工具及结构

的压力后又容易产生变形；加强层为纤维布或尼龙布，主要是提高抛光头抵抗膨胀变形的能力，使得抛光头在充有一定的气压条件下，不至于产生过大的膨胀变形；抛光膜是为了提高抛光头的耐磨性并对工件产生一定的抛光加工，这部分一般选择使用聚氨酯抛光垫。

（2）去除函数的建立

理论和实践表明，气囊抛光过程中光学表面去除函数模型与各种工艺参数之间的关系可以通过普雷斯特方程来描述。虽然以普雷斯特方程为依据，可以求解出压力 P 和速度 V 的数学表达式，并得到材料的去除模型，但由于这种数学模型有一定的局限性，无法满足实际加工的需要，为了指导实际加工可以以普雷斯特方程为依据，以实际的工艺参数为条件拟合去除函数模型。该方法建立的模型能够随着实际加工条件的改变而变化，因此能够产生用于实际加工的三维模型。图 4－16 是通过一系列抛光工艺试验后确定的去除率函数 $f(x,y)$，由图可以看出该去除函数是一个近似高斯曲面，试验采用氧化铈抛光液，抛光材料为 K9 光学玻璃，抛光模为聚氨酯材料。其工艺参数条件为气囊压缩量 0.2mm，气囊主轴转速 300r/m，进动速度 40r/m，进动角为 20°，充气压力为 100kPa。

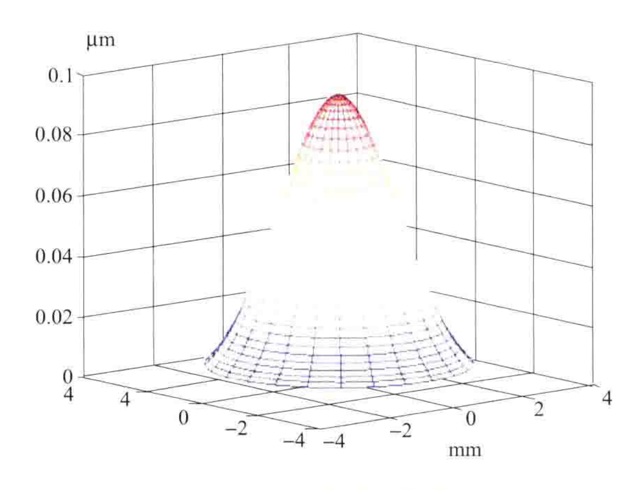


图 4－16　去除率函数模型

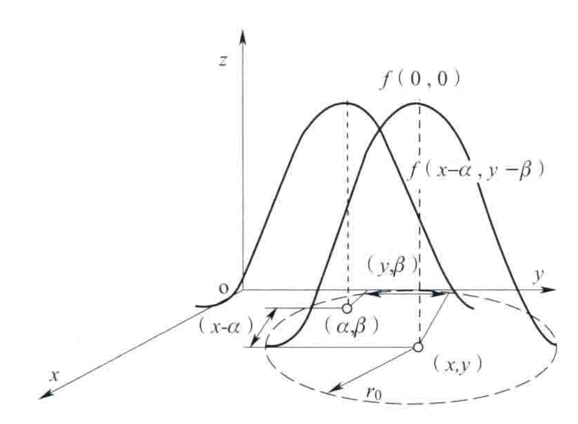


图 4－17　进动抛光材料去除叠加原理图

（3）面形控制原理

进动抛光属于确定性加工技术，确定性加工是 CCOS 加工技术的基础。设抛光头在工件表面任意一点的驻留时间 $d(x,y)$，则去除函数可表示为去除率函数 $f(x,y)$ 与驻留时间 $d(x,y)$ 的卷积形式

$$h(x,y) = f(x,y) \cdot d(x,y) \tag{4-3}$$

由卷积概念将上式写成积分形式可以得到

$$h(x,y) = \iint f(x-\alpha, y-\beta) \cdot d(\alpha,\beta)\,\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta \tag{4-4}$$

在计算机控制下抛光头相对工件沿一定的轨迹进行抛光运动时，任意一点的去除量是多个点位的驻留时间与这些点位在该点的去除率的乘积的叠加，因此将式（4－4）离散展开可以得到总的去除量

$$h(x,y) = \Sigma_{\alpha}\Sigma_{\beta} f(x-\alpha, y-\beta) \cdot d(\alpha,\beta)\Delta\alpha\Delta\beta \tag{4-5}$$

式（4－5）中，去除率函数 $f(x,y)$ 与抛光头尺寸和材料性能、抛光压力、抛光速度等因素有关，上部分已经确定其具体表达式；去除函数 $h(x,y)$ 可以通过测量工件实

际面形数值后与理论面形比较得到。当知道 $h(x, y)$ 和 $f(x, y)$，就可以通过迭代等方法求出驻留时间 $d(x, y)$，从而实现进动抛光的面形控制，其加工后的残余误差为

$$e(x,y) = h(x,y) - f(x,y) \cdot d(x,y) \tag{4-6}$$

（4）驻留时间算法

目前，国内外对于驻留时间的求解主要有傅立叶变换和矩阵迭代求解两种算法，本文提出的算法是在矩阵运算的基础上进行推导计算，首先将待去除量 $h(x, y)$ 分层，每层给定一个阈值，将该层残余误差消去到阈值之后计算下一层，直到全部误差消去到预计面形误差位置，然后在此基础上继续进行迭代，并判断残余误差的方差及平方和达到最小时的驻留时间，将其记录输出即为通过本算法得到的驻留时间函数。这种分层阈值去除法相比于传统的矩阵求解计算量减小，收敛速度明显加快，具体步骤如下：给定驻留时间一个初值矩阵，d_0 为初值

$$d(x,y) = \begin{bmatrix} d_0 & \cdots & d_0 & \cdots & d_0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ d_0 & \ddots & d_0 & \ddots & d_0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ d_0 & \cdots & d_0 & \cdots & d_0 \end{bmatrix}_{mn} \tag{4-7}$$

参照待加工工件面形及加工过程，先将待加工区域离散成一系列将要加工的矩阵

$$(x,y) = \begin{bmatrix} (x_{11},y_{11}) & \cdots & (x_{1k},y_{1k}) & \cdots & (x_{1n},y_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ (x_{k1},y_{k1}) & \ddots & (x_{kk},y_{kk}) & \ddots & (x_{kn},y_{kn}) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ (x_{m1},y_{m1}) & \cdots & (x_{mk},y_{mk}) & \cdots & (x_{mn},y_{mn}) \end{bmatrix} \tag{4-8}$$

然后对这些加工点的位置进行判定，每一个待加工点 (x, y) 都可能被其周围加工点 (α, β) 影响加工，根据加工区域范围来判定这些影响点的位置和个数，并将其记录下来，由这些位置关系代入去除率函数 $f(x-\alpha, y-\beta)$ 求解该加工点区域内各点的去除率，将此时不在加工范围内的各点的去除率置为零，组成一个新的去除率矩阵

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & f(x-\alpha,y-\beta) & \cdots & f(x-\alpha,y-\beta) & \vdots \\ 0 & \ddots & f(0,0) & \cdots & 0 \\ \vdots & f(x-\alpha,y-\beta) & \cdots & f(x-\alpha,y-\beta) & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{mn} \tag{4-9}$$

将 $f(x, y)$ 内各元素与给定的驻留时间矩阵 $d(x, y)$ 中相应的各元素相乘并累加起来即可得到该加工点在驻留时间函数下的去除量，对各个加工点遍历求解，即可得到每个加工点在该驻留时间函数下的去除量矩阵 $z(x, y)$，并与初始待去除量 $h(x, y)$ 作差，得到新的待去除量 $Q(x, y)$

$$Q(x,y) = h(x,y) - z(x,y) \tag{4-10}$$

若该去除量大于该层的阈值，则在相应点的驻留时间基础上加上一个值 Δt，该值由人为设定，根据精度要求可设定为0.05～1s，若该去除量 $Q(x, y)$ 小于零，则在相应的驻留时间基础上减去一个值 Δt。每层计算完之后进入下一层计算，这样周而复始地迭代，直到得到的待去除量，即残余误差小于预定值，最后判定残余误差的方差和平方和最小的一组驻留时间数据，就得到了完整的驻留时间函数。具体方法如图4－18所示。

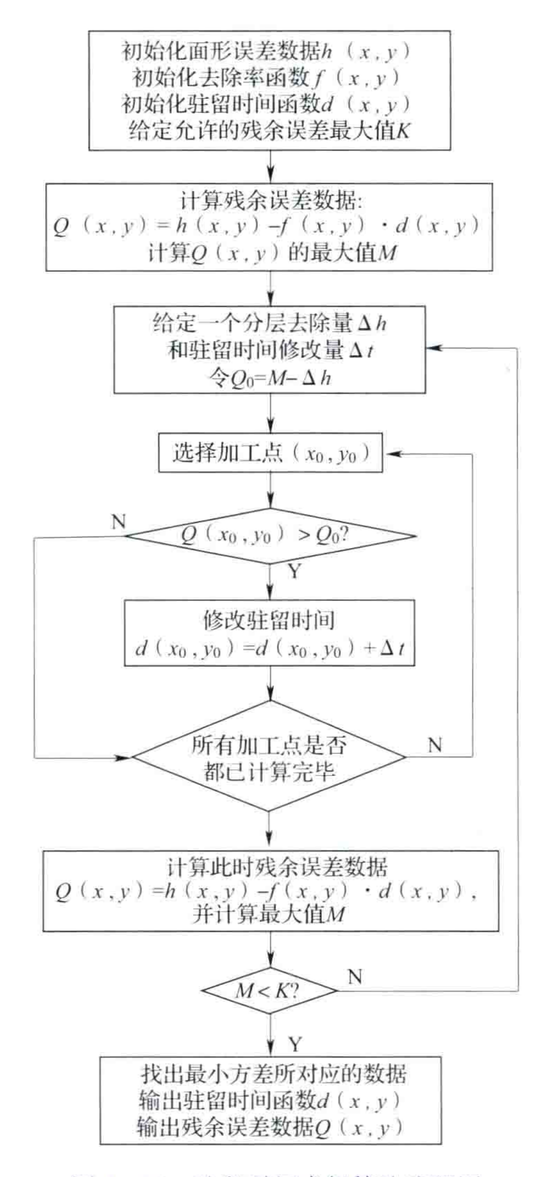
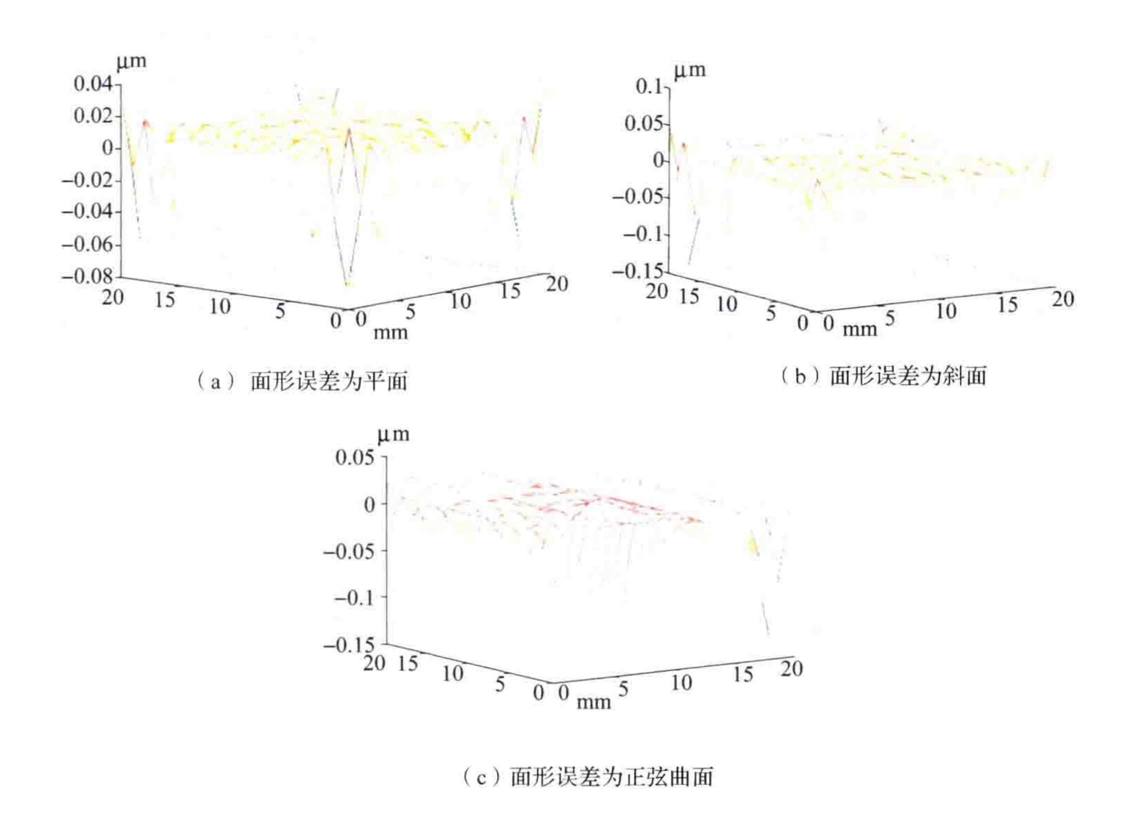


图4－18　驻留时间求解算法流程图

（5）验证试验及分析

①Matlab仿真

通过Matlab根据不同的初始面形误差分别进行仿真以验证算法的准确性，加工区域范围为20mm×20mm的矩形平面区域，具体如下：a. 初始面形误差为平面，去除量为1μm，其仿真结果如图4－19（a）所示；b. 初始面形误差为斜面，去除量范围为1～2μm，其仿真结果如图4－19（b）所示；图4－19（c）为初始面形误差为正弦曲面、去除量范围为0～2μm的仿真结果。



（a）面形误差为平面

（b）面形误差为斜面

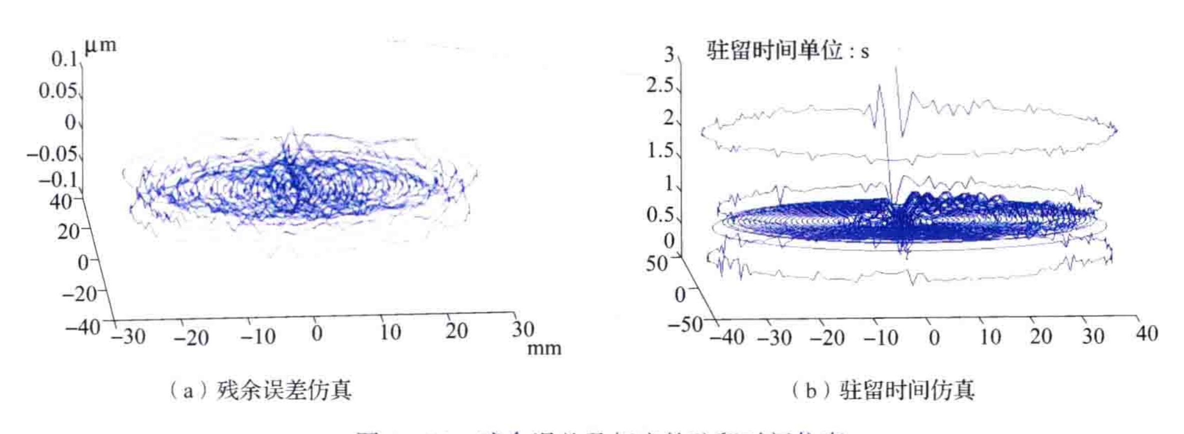
（c）面形误差为正弦曲面

图4－19　MATLAB加工误差仿真结果

根据三种面形的仿真结果可以看出，最后整个面形的精度都可以收敛在0.2μm以内，中间部分面形基本可以收敛在0.1μm，但边缘收敛结果较差，这可能是由于抛光过程中的边缘效应引起的，因为对单个点的抛光加工时其抛光区域为一近似圆形，每个点的加工都会影响到周围点的面形情况，在边缘点附近这些点的影响呈现不规律趋势，将导致算法出现偏差，从而产生边缘效应，具体原因还有待继续进行试验研究。通过结果分析可以看出本算法在理论上是可行的，可以指导进动气囊抛光过程中驻留时间算法的计算研究。

②加工试验及分析

最后对初始面形PV值为0.756μm的K9光学玻璃平面进行进动抛光加工，实际加工过程中以螺旋线轨迹进行加工，主要加工区域为半径$R=20$mm的圆形区域，其面形加工残余误差及驻留时间仿真结果如图4－20所示。



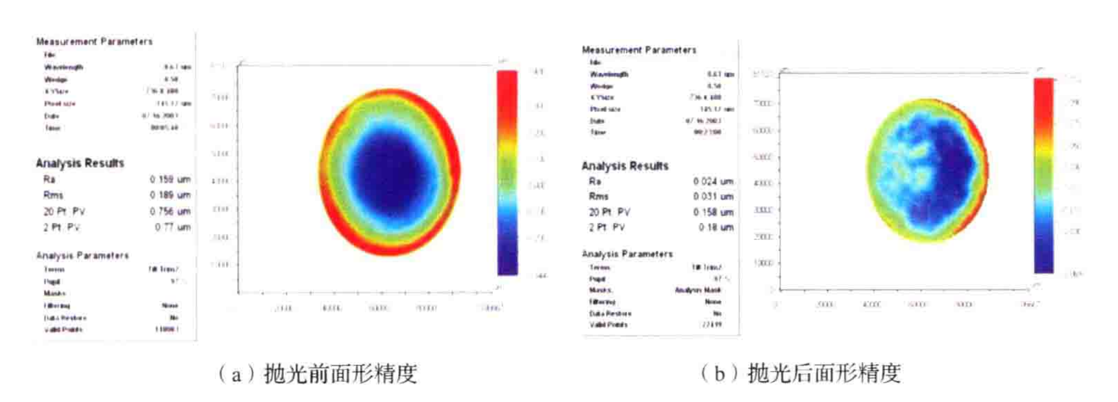
（a）残余误差仿真

（b）驻留时间仿真

图4－20　残余误差及相应的驻留时间仿真

其中，图4－20（a）为加工结果面形误差仿真，可以看出面形精度收敛于0.1μm以内，图4－20（b）为驻留时间仿真，由图示可以看出边缘部分驻留时间停留较长，从而会在加工过程中产生了边缘效应，即边缘部分的面形加工出现不规律的趋势，需要在以后加工中引起重视。

图4－21（a）和（b）分别表示了抛光前后的面形测量结果，考虑到本算法的缺点是边缘部分面形不容易控制，因此在实际加工时对整个玻璃表面并没有全部加工，设定待去除量0.8μm，抛光总时间为5783s，从图中可以看出抛光后的表面粗糙度 *Ra* 从加工前的0.159μm减小到了0.024μm，面形PV值由0.756μm减小到了0.158μm。



（a）抛光前面形精度　　（b）抛光后面形精度

图4－21　抛光前后面形测量结果对比

（6）气囊抛光边缘控制技术

本书4.2.5.2提到了气囊抛光边缘精度较难控制，但对于大光学元件边缘的面形质量十分重要，小区域的边缘效应会对红外背景产生比较大的影响，这也是目前空间光学元件加工过程急于解决的关键技术之一，为了对气囊抛光工件的边缘进行有效控制，可以采取以下措施：

①在被抛光元件外围镶上一些垫块，将工件的边缘包围起来进行抛光。抛光结束后，分离出被抛光元件。镶嵌块可以避免气囊运动到工件边界时，由于气囊变形产生的受力不均匀，而且镶嵌块充当了气囊抛光运动的“回程带”，气囊可以运动到工件边界以外，避免了抛光气囊在工件边界的加速或减速，使整个工件均匀抛光。但该方法也存在不少问题，为了避免由于热胀等产生的影响，镶嵌块和工件的材料性能必须保持一致，而且每一个工件加工都要设计专门的镶嵌块，使得加工成本很高。加工结束后伴随胶结应力的释放，有可能扭曲被抛光元件，破坏面形精度。

②制造抛光元件时，将被抛光元件外形尺寸加大，抛光后磨边处理。但这种方法有可能引起材料内部应力的重新分布，从而导致被抛光元件形状的变化。

③根据抛光所具有的工艺特点，优化抛光的工艺参数和控制算法，主动控制被抛光元件的边缘质量，不需要其他的辅助工艺。算法中抛光气囊运动到工件边界时，按照一定的数学规律逐渐减小压缩量，保证不露边。

4.3　大气等离子体超精密加工技术

大气等离子体加工是20世纪90年代新兴的一种加工方法，采用高频电磁场在大气压下激发某些惰性气体（如He或Ar等）产生等离子体作为载体，使得反应气体在等离子

体活性氛围中被激发产生活性反应原子，与待加工材料表面的原子发生化学反应并生成挥发性的气体产物，从而达到材料去除的目的。它具有很多其他加工方法所不能同时具备的突出优点：材料去除率比较高，大大提高了加工效率，缩短加工时间从而降低了长加工周期所导致的风险；可以获得纳米级的表面粗糙度，同时不产生表面和亚表面损伤，是一种确定性加工方法，可以通过等离子体炬的设计以及加工参数的设置获得较小的去除函数分辨率；设备相对简单，不需要真空系统，减低了成本和维护费用。发展至今，日本、美国和德国先后开展相关研究，运用大气等离子体加工方法进行加工，并已经取得了一定的成果。

根据大气等离子体加工装置进行分类，可以分为以下三大类加工方式：电感耦合等离子体加工、电容耦合等离子体加工和微波等离子体加工。

4.3.1　大气等离子体加工原理

4.3.1.1　化学原理

等离子体射流加工过程是一个大气压等离子体化学刻蚀过程。刻蚀原理是利用等离子体炬，采用某些惰性气体（以 Ar 为例）作为等离子体激发气体，氟基气体作为化学反应气体，O_2作为辅助气体，将其注入到电感耦合等离子体炬的核心并被高能电子激发，产生适于刻蚀硅基材料的活性 F 原子，通过 F 原子与材料表面 Si 原子之间的反应，生成挥发性的反应产物 SiF_4，留下无损伤的表面。大气等离子体炬作为刻蚀工具，具有近高斯型的去除轮廓。常用 CF_4、SF_6、NF_3等氟基气体刻蚀 Si、SiO_2、SiC 等硅基材料。所涉及的化学反应的放热性质允许材料去除得以快速进行，并且在 Ar 等离子体提供的对流和辐射能转移的作用下，该反应过程得到促进并呈各向异性。这个过程的动力学受等离子体炬的温度分布和相关的被转移到工件表面的温度影响。基本原理如图 4－22，相关化学反应方程式为：

对于碳化硅（SiC）　$SiC + CF_4 + O_2 \rightarrow SiF_4\uparrow + 2CO\uparrow$　（4－11）

或　$SiC + 4F + 2O \rightarrow SiF_4\uparrow + CO_2\uparrow$　（4－12）

对于熔石英（SiO_2）　$SiO_2 + CF_4 \rightarrow SiF_4\uparrow + CO_2\uparrow$　（4－13）

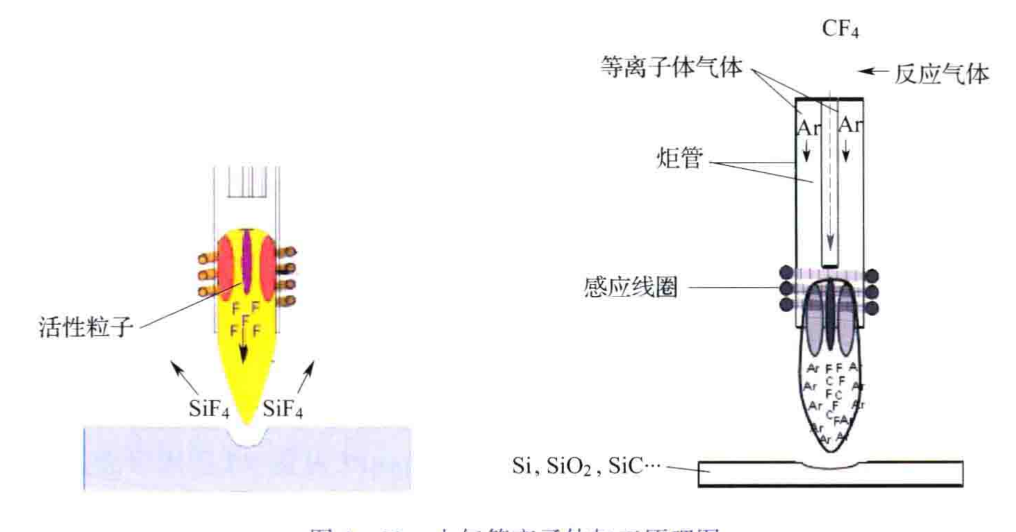


图 4－22　大气等离子体加工原理图

这就是大气等离子体射流加工硅基材料的最基本加工原理。这种加工是靠与工件表面的原子发生化学反应的方法实现材料去除的，整个过程中不存在机械接触和物理载荷，因而可以避免机械力对材料表层及亚表层造成的损伤，获得无破坏层的超光滑表面。

4.3.1.2 动力学原理

大气等离子体射流加工中的核心过程是工件表面的物理、化学反应过程。由于加工时间与气相反应、传输时间相比要大的多，此时各个试验参数已经稳定，所以可以视加工过程是在稳态下进行的。因此虽然加工系统中反应过程很复杂，但是可以通过稳定的气相粒子密度求解粒子数守恒方程组，帮助我们来了解加工过程的状态。

等离子体加工的表面动力学过程比较复杂，期间可能发生的过程包括：活性粒子到达表面（速率常数 K_a）、表面吸附、反应并生成产物、产物解吸附（K_d）、返回到气相中等。针对电感耦合等离子体射流加工硅基材料的过程，本节仅对部分表面动力学过程进行介绍。

（1）化学吸附和解吸附

分子 A 的吸附和解吸附反应（可逆反应）为

$$A(g) + S \underset{K_d}{\overset{K_a}{\rightleftharpoons}} A:S \tag{4-14}$$

根据兰茂尔动力学原理，吸附到表面的分子的通量密度与未被分子吸附的位点比例成正比，因此

$$\Gamma_{ads} = K_a n_{AS} n'_0 (1-\theta) \tag{4-15}$$

因为化学吸附分子通量密度可以表示为

$$\Gamma_{ads} = s\Gamma_A = \frac{1}{4} s \, \bar{v}_A n_{AS} \tag{4-16}$$

可以解出吸附速率系数

$$K_a = \frac{1}{4} s_0 \frac{\bar{v}_{AB}}{n'_0} \tag{4-17}$$

解吸附分子通量密度可以表示为

$$\Gamma_{desor} = K_d n'_0 \theta \tag{4-18}$$

吸附解吸附通量密度相等，因此被分子吸附的位点比例为

$$\theta = \frac{n_{AS} K_a / K_d}{1 + n_{AS} K_a / K_d} \tag{4-19}$$

式中：Γ_{ads}——吸附到表面的分子的通量密度；

n_{AS}——气相分子在表面的密度；

n'_0——吸附位点面密度；

θ——被分子吸附的位点比例；

S——黏附系数；

$\bar{v}_A$——分子平均速度

S_0——初始黏附系数；

Γ_{desor}——解吸附分子通量密度。

（2）物理吸附

与化学吸附不同的是，物理吸附中位点密度通常不固定，同一位点可以吸附 i 层原

子。同样，吸附、解吸附通量密度相等，再利用归纳法计算

$$K_a n'_i n_{AS} = K_d n'_{i+1} \tag{4-20}$$

$$n'_{i+1} = \beta n'_i (\beta = K_a n_{AS}/K_d) \tag{4-21}$$

$$n'_i = n'_0 \beta^i \tag{4-22}$$

单位面积被覆盖的位点数为

$$n'_c = \sum_{i=1}^{\infty} n'_i = n'_0 \frac{\beta}{1-\beta} \tag{4-23}$$

（3）与表面的反应

一类反应，假设 A 先发生反应（见式（4-24））吸附到表面 S，然后直接与 S 反应生成气相产物 AS 且立即解吸附

$$\mathrm{A:S} \xrightarrow{K_r} \mathrm{AS}(g) \tag{4-24}$$

吸附点守恒方程

$$\frac{\mathrm{d}n'_{A:S}}{\mathrm{d}t} = K_a n_{AS} n'_0 (1-\theta) - K_d n'_0 \theta - K_r n'_0 \theta = 0 \tag{4-25}$$

则

$$\theta = \frac{1}{1 + (K_d + K_r)/K_a n_{AS}} \tag{4-26}$$

生成 AS 的反应速度

$$R_{AB} = K_r n'_0 \theta \tag{4-27}$$

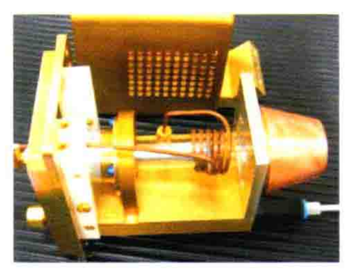
式中：K_r——反应速率系数；

$n'_{A:S}$——被吸附分子占据的吸附位点面密度；

R_{AB}——AS 的反应速度。

4.3.2 电感耦合等离子体加工技术

电感耦合等离子体从发现至今，主要应用于光谱分析技术。这是一种在大气压条件下的非接触式、子孔径、确定性的材料去除技术。采用电感耦合方式，利用质谱分析中商业化的标准炬管，在射频电源作用下产生等离子体射流进行加工。由美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室（Lawrence Livermore National Laboratory）提出，美国 NASA 于 2004 年开始投入资金资助研究，后又与英国克兰菲尔德大学超精密技术中心进行合作。加工过程中不存在机械力，可以获得无污染、无亚表面损伤的表面。哈尔滨工业大学引入射流加工方法用于硅基材料的加工，这是电感耦合等离子体的新应用。它是大气等离子体加工方法中的一种，基于电感耦合等离子体炬，在大气压下形成一个近高斯型的稳定的刻蚀足迹进行化学刻蚀，结合了材料去除率高和非接触加工的特点，具有加工效率高、无亚表面损伤、成本低等优势，是一种极具发展潜力的加工方法。目前，根据材料、之前加工形式的不同，利用该方法加工 SiC，去除率可以达到 2 ~ 3mm^3/min。加工 SiC 抛物面，面形误差小于 0.05λ（rms），表面粗糙度小于 1nm（rms）；加工一个直径 175mm 的 CVD-SiC 工件，14.7h 之后其面形误差 PV 值从 38μm 降到了 1μm；加工一个直径 100mm 的熔石英工件，12min 2 次重复后其面形误差从 0.124λ（rms）降为 0.015λ（rms），其设备如图 4-23，产品如图 4-24 所示。



（a）电感耦合加工炬管的实物图



（b）Helios 1200

图 4-23　加工设备图



（a）SiC共轴抛物镜



（b）熔石英工件

图 4-24　RAPT 加工产品图

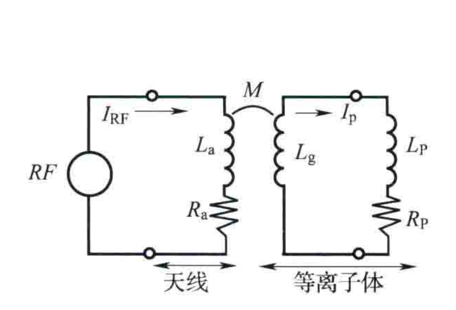
4.3.2.1　电感耦合等离子体的产生

使电感耦合等离子体发生装置产生炬焰其实就是使电感耦合等离子体发生装置内的工作气体电离。电感耦合等离子体炬焰的产生是电感耦合等离子体射流加工的前提。

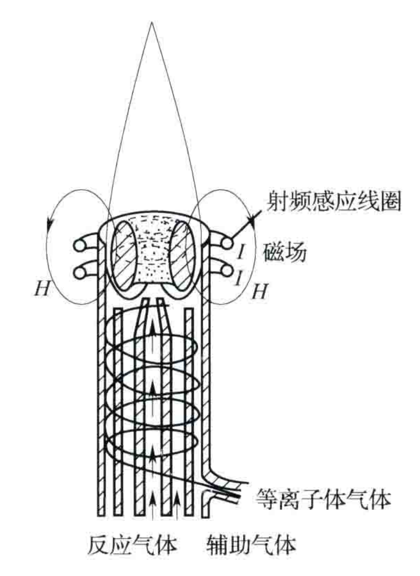
其产生原理则可以把电感耦合等离子体发生装置抽象成一个高频变压器模型。首先，给炬管通入工作气体。当感应线圈两端与高频电源接通时，会在感应线圈内产生高频电流。该高频电流会在炬管中感生出沿感应线圈的轴线方向的高频磁场。通常情况下气体不是导体，无法产生炬焰。此时在等离子体炬管口处引入高频的电火花，高频电火花可以电离少量的 Ar，产生电子和离子等导电粒子，使炬管中出现导电体。根据电磁感应定律，导电粒子不断做高速运动，最终产生环形感应电流。感应线圈可以看作是变压器的初级线圈，电感耦合等离子体的感应电流则是次级线圈，等效电路如图 4-25（a）所示。这种相互作用使电感耦合等离子体感应区中的粒子运动变强，电离出新电子、离子，并产生焦耳发热效应和光效应，最后产生电感耦合等离子体炬焰，如图 4-25（b）所示。电感耦合等离子体在感应区处呈耀眼的白炽状态，炬焰呈明亮的白色，外形仿佛一滴刚形成的水滴。

电感耦合等离子体通过感应线圈的电磁感应作用，把高频电源中的能量耦合给等离子体炬管中的 Ar，从而形成长期稳定的炬焰。由于这种能量传递方式是非接触的，因此电感耦合等离子体也被认为是一种无电极的等离子体。

根据汤姆生放电原理，电子需要得到足够的能量才能电离，以此作为气体击穿判据，则磁场强度需要满足让电子在小于一个自由程时间内获得大于电离能的能量。因此最小磁场强度 $B_{\min}$ 需满足条件



（a）电感耦合等离子体的等效电路图



（b）电感耦合等离子体形成示意图

图 4－25　电感耦合等离子体的原理示意图

$$\frac{v_{e0}^2 + (\omega\lambda_1)^2}{\omega\lambda_1} = \frac{ebB}{m} \tag{4-28}$$

B 的最小值 B_{min} 出现在 $\omega\lambda_1 = v_{e0}$ 时，此时

$$B_{min} = \frac{2mv_{e0}}{eb} \tag{4-29}$$

式中：B_{min}——电离需要的最小磁场强度；

v_{e0}——电子加速后的最小速度；

λ_1——t 时间内电子的路程。

电感耦合等离子体所具有的部分性质是在 19 世纪 60 年代弗里曼和蔡斯建立的“通道模型”中解释的。在他们的模型中，等离子被认为是半径为 r_n（比约束管的内径略小几毫米）的均匀的导电性的圆柱体，受空间上均匀的磁场作用，该磁场幅值随时间呈正弦变化，如图 4－26 所示。该模型假设炬管温度是保持在室温下的，并且和等离子体之间存在一个薄层。他们采用了简化的艾伦贝斯－海勒方程和麦克斯韦方程，并假设在核心处的能量耗散是通过向等离子体炬管壁的辐射热传导来平衡的。这个模型解释了等离子体中感应电流的产生和趋肤效应。这是最早、最简单的电感耦合等离子体模型。

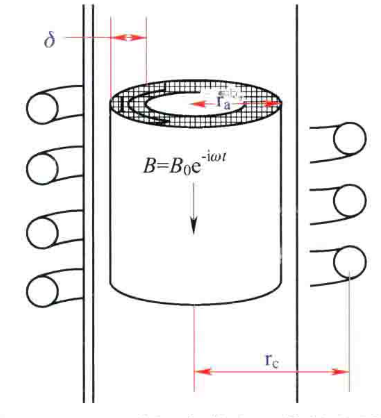


图 4－26　电感耦合等离子体简化模型

（1）环形结构和趋肤效应

点燃的电感耦合等离子体中感应区域的等离子体，是环形感应电流所在的位置，外圈呈明亮的环形，温度较高；中间是半透明的通道，亮度较暗，温度较低。

电感耦合等离子体具有环形结构的原因主要是因为趋肤效应。

趋肤效应（skin effect）是指高频感应电流在感应作用下，不是均匀分布在导体中，而是大部分聚集

在导体外圈边缘的环形薄层内的现象。等离子体是一种准中性的导体，在高频电场的作用下产生了趋肤效应。趋肤效应常用趋肤深度来衡量。趋肤深度是指电流下降到导体表面电流的 1/e 时距离导体表面的距离，用字母 δ 表示（e 是自然对数底数）。趋肤深度 δ 的公式

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \tag{4-30}$$

式中：μ——相对磁导率（H/cm），针对气体时 $\mu=1$；

σ——气体的电导率（S/cm），与温度和气体压力有关；

f——高频电源的频率（Hz）。

在大气压下，如果取感应等离子体的温度为 10000K，此时电导率约为 30S/cm，高频电源频率选为 27.12MHz，通过计算可以知道在此条件下趋肤深度 δ 约为 2mm。

由于趋肤效应产生的环形结构，使得电感耦合等离子体形成中间通道，可以使反应气体通入。由式（4－30）可知当电源频率较小时，趋肤深度较大，不易形成中间通道，这时反应气体会从等离子体的表面滑过，等离子体呈泪滴状，不稳定，容易熄灭。反之当电源频率较大时，趋肤效应变强，趋肤深度较小，比较容易点火，等离子体更稳定。

环形结构还与工作气体的冲击有关。电感耦合等离子体采用的是切向进气。切向进气方式会使气流产生旋涡，使中心部分的气压低于外部，有助于形成中间通道。

门斯和伯德克在通道模型的基础上进行了关于耦合效率 η_c 的研究。耦合效率是指射频功率被等离子体吸收的百分数。研究表明耦合效率与耦合参数（$\kappa=\sqrt{2}r_n/\delta$）、等离子体半径和线圈半径之比（$r_n/r_c$）有关，如图 4－27 所示。可以看出，等离子体半径和感应线圈半径之比越大越接近于 1 时，耦合效率越高。因此为了获得最大效率，应尽量使等离子体半径接近感应线圈半径。这可以通过增大炬管的结构尺寸来达到，但是这会导致维持等离子体的最小功率和等离子体炬管壁的热负荷增加。从图 4－27 中还可以看出，当等离子体半径和趋肤深度在 1.5～4 范围内，电感耦合等离子体可以获得最佳耦合。由式（4－30）可知，趋肤深度与电源频率有关，因此耦合效率也与电源频率有关。

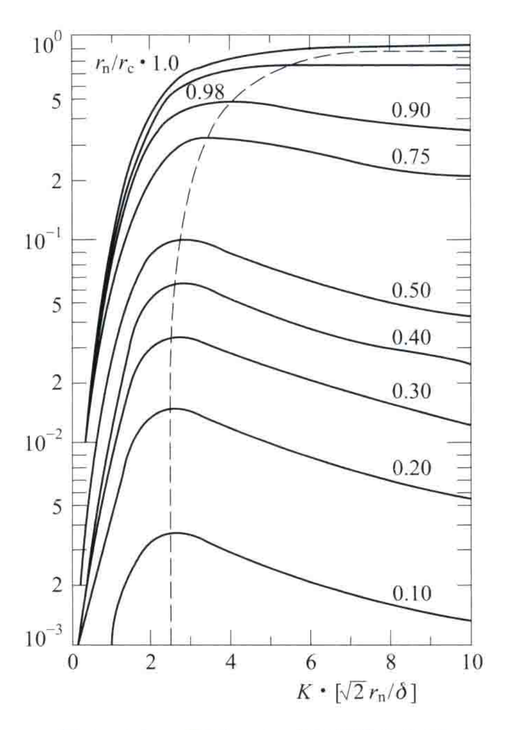


图 4－27　不同 r_n/r_c 值时耦合效率随耦合参数的变化图

（2）电感耦合等离子体的温度

等离子体按照是否被完全电离被分为高温等离子体和低温等离子体。

低温等离子体包括热等离子体和冷等离子体。等离子体中各种粒子（电子、离子、中性粒子）的温度趋于相等的状态叫做热平衡状态。近似或达到这种状态的为热等离子体，它满足麦克斯韦定律、波尔兹曼定律、萨哈方程和普朗克定律。如果等离子体中的一部分不符合普朗克定律，却

符合其他定律，局部温度可以认为是接近相等的，此时处于局部热平衡状态。在低气压条件下放电的等离子体，电子温度远大于中性粒子温度，此时称作冷等离子体。

目前认为电感耦合等离子体属于热等离子体，Ar^-电感耦合等离子体既有局部热平衡区域又有非局部热平衡区区域，即电感耦合等离子体在一定程度上是偏离完全热平衡状态的。

关于电感耦合等离子体温度的研究有很多。一种是通过测量进行研究，常用发射光谱法。由前面的内容可知，电感耦合等离子体火焰是感应线圈内的高频感应电流加热气体形成的。根据等效电路，如图4－25（a）所示，等离子体吸收的功率P_{abs}可以表示为

$$P_{abs}=\frac{\omega^2 M^2 R_P}{\omega^2 (L_g+L_p)^2+R_p^2}I_{RF}^2 \tag{4-31}$$

式中：M——互感；

R_P——等离子体的电阻；

L_g——由环形等离子体形状所决定的电感；

L_p——电子惯性带来的电感；

I_{RF}——高频电流。

可见高频电源能量主要集中在环形感应区的趋肤层中，所以趋肤层的温度最高、中心区域温度低，趋肤层通过焦耳加热以及热传导、对流方式传递能量，中间气体通过加热的热电离形成等离子体。温度在轴向方向的分布如图4－28所示，沿电感耦合等离子体火焰从下到上是降低的，可从10000K降到6000K，在尾焰部分已经不再存在环状结构了，所以温度比较低。温度在径向方向的分布如图4－29所示，最高温度与中心有一定偏移。另外，研究表面电感耦合等离子体中同时存在两种温度模型，即局部热平衡区和非局部热平衡区。

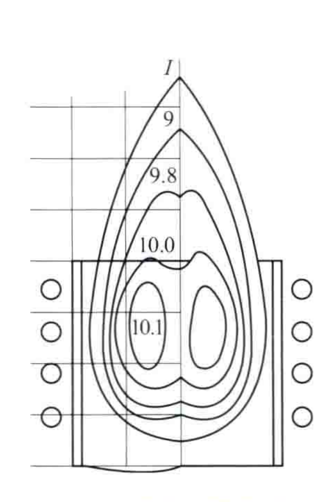


图4－28　电感耦合等离子体轴向截面内的电子温度分布

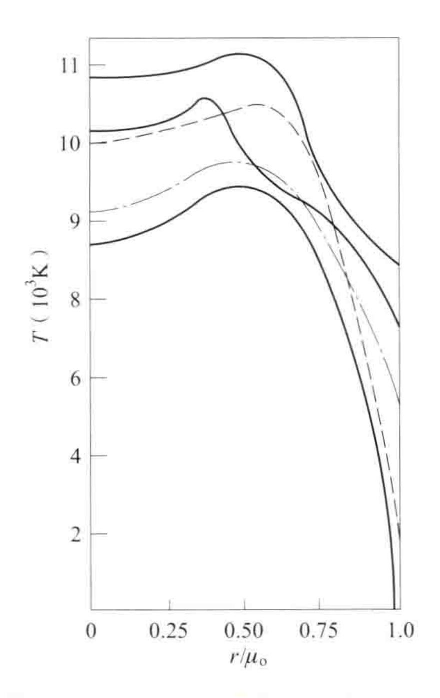


图4－29　Ar^-电感耦合等离子体感应区域的径向温度分布

另一种是通过建立模型进行研究，经历了从一维模型、二维模型到应用FLUENT软件的三维模型的发展，近年来又在三维模型中补充了炬管壁、线圈及其几何参数等因素，使模型逐渐完善起来。

假设：①气流是稳定的且是层流；②等离子体是光学薄的且处于局部热平衡状态；③能量方程中的黏性耗散和位移电流被忽略不计。在此条件下，根据流体力学，质量、动量和能量输运方程分别为

$$\nabla\cdot(\rho u) = 0 \tag{4-32}$$

$$u\nabla\cdot(\rho u) = -\nabla p + \nabla\cdot\left[\mu(\nabla u + \nabla u^{T}) - \frac{2}{3}\mu\nabla\cdot(ul)\right] + \rho g + JB \tag{4-33}$$

$$u\nabla\cdot(\rho h) = \nabla\cdot\left(\frac{k}{C_p}\nabla h\right) + JE - R \tag{4-34}$$

由线圈电流和等离子体中感应出的电流产生的磁场可以用麦克斯韦方程的矢量表达式描述为

$$\nabla^2\boldsymbol{A} - i\omega\mu_0\sigma\boldsymbol{A} + \mu_o J^{coil} = 0 \tag{4-35}$$

式中：ρ——等离子体密度；

u——速度；

p——压力；

μ——黏度；

T——温度；

h——热焓；

g——万有引力常量；

J——等离子体中的电流密度；

B——磁感应强度；

k——热传导率；

C_p——比热；

E——电场；

R——体积辐射损失；

μ_0——真空磁导率；

σ——等离子体导电率；

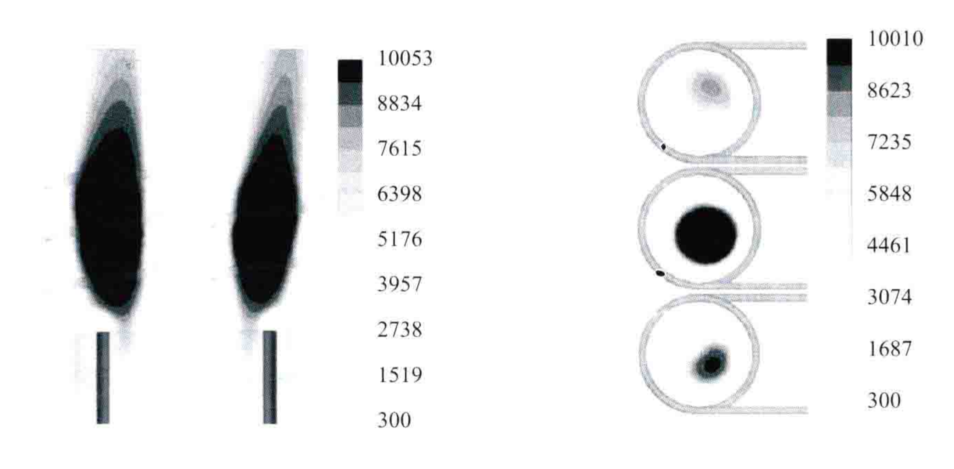
f——电磁场频率，$\omega = 2\pi f$；

J^{coil}——线圈电流；

$\boldsymbol{A}$——矢量，$\boldsymbol{E} = -i\omega\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B} = \nabla\times\boldsymbol{A}$。

边界条件：炬管的内壁设置为无滑移约束，外壁设置为300K温度；炬管进口处根据实验要求设置均匀的气体分布，出口处设置为FLUENT出流条件。结合线圈几何参数，分析结果如图4-30所示。

结果表明，等离子体放电和温度分布是非轴对称的，它的解释是这是由于感应线圈电流是有倾斜角度的并不是轴对称的，因此径向方向上的洛仑兹力是不平衡的、非轴对称的；等离子体温度分布相对于炬管轴线的偏离与线圈的几何参数有关（线圈在炬管轴线方向上的长度、线圈回转的倾斜角和线圈结尾部分的形状），线圈几何参数非轴对称程度越强，温度分布的偏离越严重；同时在炬管壁上可以发现温度分布的“热点”的形成。



（a）2个视角的等离子体温度场分布

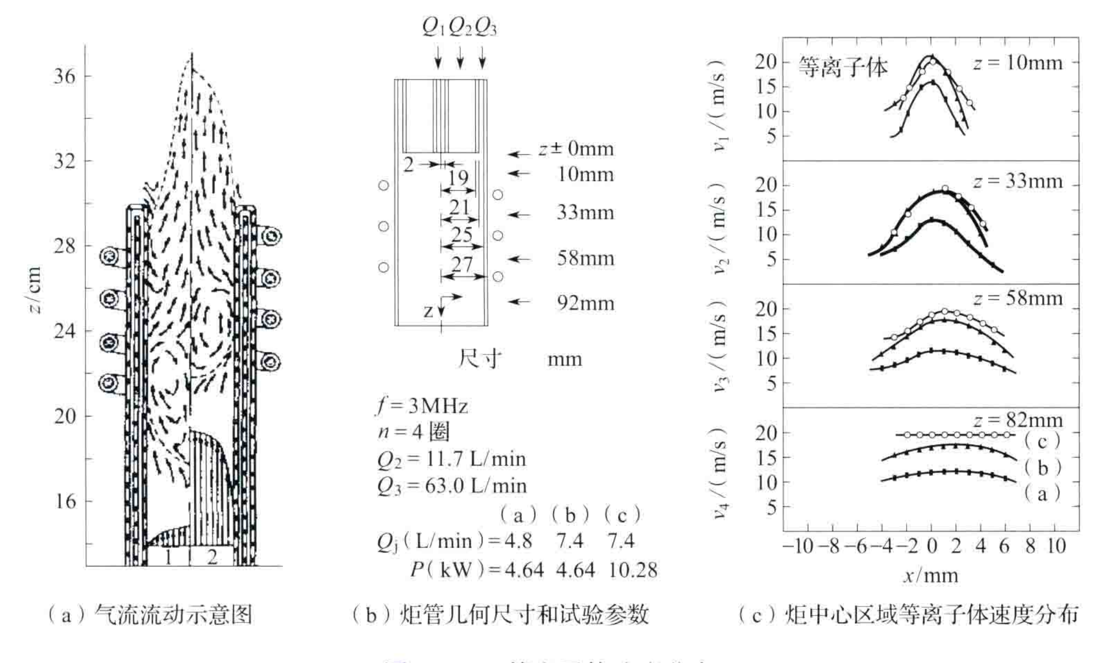
（b）三个不同高度水平面（0.05m，0.1m，0.2m）上的等离子体和炬管壁的温度分布

图 4－30　等离子体温度场分布

（3）电感耦合等离子体的速度

同温度的研究方法类似，速度的研究也有测量法和建模法。

测量法有示踪技术和激光多普勒测速法等。研究表明在感应线圈区域存在因为电磁泵产生的回流涡旋，工作气体流量越大、回流涡旋越靠近气体进入端。在不同试验条件下的感应线圈区域的等离子体速度分布如图 4－31 所示，在线圈上游速度分布近似呈抛物线形状，在下游则平坦很多。



（a）气流流动示意图　（b）炬管几何尺寸和试验参数　（c）炬中心区域等离子体速度分布

图 4－31　等离子体速度分布

近年来利用 FLUENT 软件建立了关于速度的三维模型，如图 4－32 所示。外管的冷却气体在放电上游是以涡流方式移动，当它靠近等离子体的时候则变成轴向分量占主导。中层管的等离子体在任何位置都不足以产生涡流运动。内层气体在内层管端口产生回流旋

涡，这是因为很强的轴向速度场直接对着气体放电的底部，因此中层气体的流量要足够大来超过反向涡流。回流旋涡促进了等离子体和反应气体的混合，使其整体更均匀。

4.3.2.2 电感耦合等离子体加工试验

哈尔滨工业大学王波教授课题组针对加工硅基材料的去除率进行试验，试验描述与结果如下所述。

试验前，所有的工件都经过超声波清洗仪的清洗：先用清洗液浸泡，在清洗仪中清洗 10min 一遍，再用丙酮浸泡在清洗仪中清洗 10min 一遍，然后在温水和去离子水环境中用清洗仪分别清洗 10min；试验后，用清水在清洗仪中清洗 5min 两遍。



图 4－32　气流模型

工件为反应烧结碳化硅（RB－SiC），工件尺寸为 ϕ50mm×5mm；抛光熔石英（SiO_2），工件尺寸为 60mm×60mm×3mm。加工方式是单点定点加工。由于 RB－SiC 的导热系数为 120～170 W/（m·K），SiO_2的导热系数为 1.38W/（m·K），比 SiC 的要小的多。相比之下等离子体中的热量更容易从 SiC 工件迅速的消散，SiO_2的温度更容易积累。为了保证试验过程和工件的安全，为 SiO_2工件增加了冷却台进行冷却。电感耦合等离子体射流加工硅基材料 SiC、SiO_2的过程中有众多的试验参数，主要通过以下几个加工参数的变化对加工过程的热效应和材料去除率产生的影响进行分析。

（1）加工距离

试验采用单因素法，根据现有的试验条件，对于 SiC 加工距离取 7～12mm，对于 SiO_2加工距离取 3～15mm，步距均为 1mm，其他试验参数如表 4－1 所示，试验结果如图 4－33 所示。

表 4－1　加工距离对加工深度影响试验参数

材料	外层 Ar 流量/（L/min）	中层 Ar 流量/（L/min）	CF_4 流量/（mL/min）	（O_2/CF_4）/%	加工时间/min	加工功率/W
SiC	20	1	30	0	2	1000
SiO_2					1	

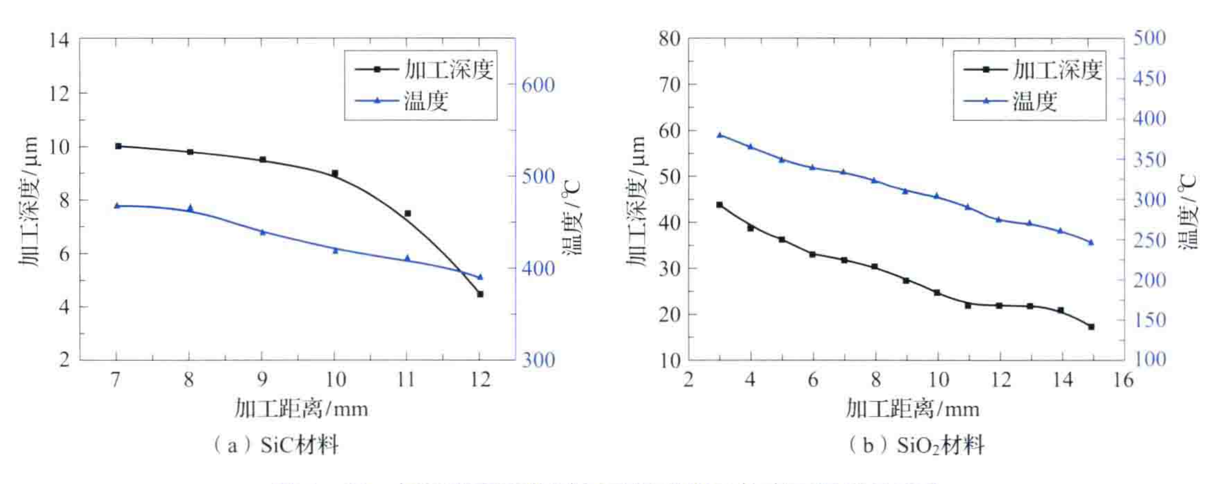


图 4－33　加工距离变化时加工深度和工件表面温度的变化

从图4－33中可以看出，两种材料的加工深度都随着加工距离的增加而减小，但并不构成严格的线性关系。对于SiC，当加工距离从7mm增大至10mm时，加工深度减小较慢；当距离大于10mm时，加工深度迅速减小。对于SiO_2，加工深度的下降速度则没有明显变化。

为了保证材料去除率，应选取较小的加工距离；但根据轮廓仪检测的结果，加工距离近的时候，去除轮廓曲线形状呈盆形，且底部有细小的波纹。因此一般采用的加工距离为10mm。

工件表面温度随着加工距离的增加而降低，可见温度对距离变化比较敏感。工件表面温度降低的原因同样与随着加工距离增加而降低的炬焰温度有关；另外也与粒子速度降低、活性减弱、反应剧烈程度减弱有关。

（2）加工功率

试验采用单因素法，加工功率取700～1200W，步距为100W，其他试验参数如表4－2所示，试验结果如图4－34所示。

表4－2　加工功率对加工深度影响实验参数

材料	外层Ar流量/（L/min）	中层Ar流量/（L/min）	CF_4流量/（mL/min）	（O_2/CF_4）/%	加工时间/min	加工距离/mm
SiC	20	1	25	0	2	10
SiO_2					1	

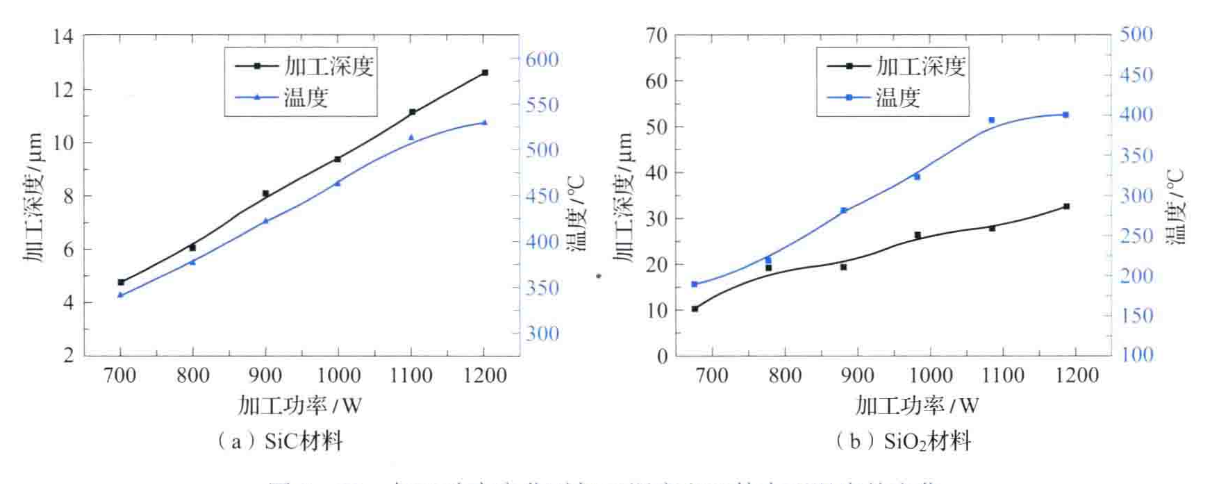


图4－34　加工功率变化时加工深度和工件表面温度的变化

从图4－34中可以看出，两种材料的加工深度和工件表面温度随加工功率的增加基本都呈线性增加，且变化极其显著。温度变化接近200℃，比加工距离带来的影响要大的多。

由式（4－31）可知加工功率是反应过程中的能量源，加工功率的增加使系统中能量增加，从而使激发过程中的等离子体获得更多的能量，电子有更大的机会与其他粒子发生碰撞并激发更多的活性反应F原子。同时，由于电感耦合等离子体加工的核心是化学反应，高功率能通过提高粒子活性从而促进化学反应的进行，使表面的化学键更容易断裂；使各种粒子与表面的碰撞变得频繁和剧烈，促进了反应生成物从工件表面的脱离，从而使

加工深度增加。加工系统源能量的增加以及由此造成的等离子体中喷出的热流的增强都是使工件表面的温度增加的原因。反过来这个温升又促进了活性反应原子和工件表面原子之间的化学反应。

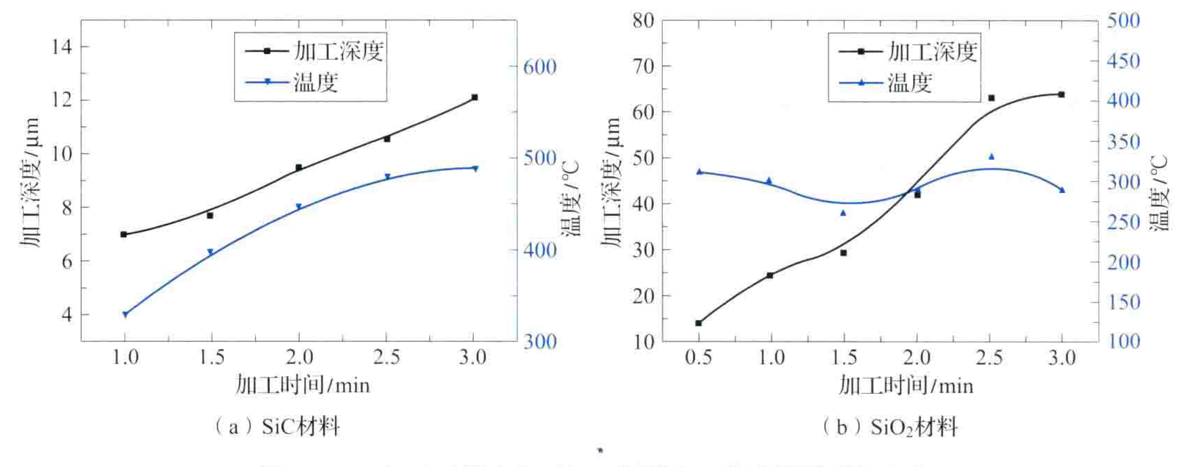
目前该电感耦合等离子体系统加工功率的工作范围是600～1800W。较高的加工功率有助于提高材料去除率，但是为了保证系统有效冷却以及加工过程的安全性，试验中一般采用的加工功率为1000W。

（3）加工时间

试验采用单因素法，加工时间取1～3min，步距为0.5min，其他试验参数如表4－3所示，试验结果如图4－35所示。

表4－3　加工时间对加工深度影响实验参数

材料	外层Ar流量/(L/min)	中层Ar流量/(L/min)	CF_4流量/(mL/min)	(O_2/CF_4)/%	加工功率/W	加工距离/mm
SiC	20	1	25	0	1000	10
SiO_2						



（a）SiC材料　　（b）SiO_2材料

图4－35　加工时间变化时加工深度和工件表面温度的变化

从图4－35可以看出，两种材料加工深度及工件表面温度都随加工时间的增加呈近似线性增加。加工时间的增加，会使更多的活性F原子对工件表面进行作用，使反应可以更充分地进行。这个结果一方面说明通过控制工作台的运动速度即控制电感耦合等离子体炬在工件表面的驻留时间可以控制加工时间，从而实现期望的加工深度；另一方面这种良好的线性关系有利于简化数控系统的算法。

SiO_2在有冷却的条件下温度在一定范围内波动；对于SiC，由于没有冷却台，温度会随着时间的增加而积累，使工件表面的温度迅速升高。长时间的温升一定会影响加工深度的线性趋势。因此，实际加工过程中，在某个固定点不宜驻留过长时间。考虑到阿列纽斯方程，采用动态加工的方法或许更有利于保证去除量的准确控制；另外可以考虑给工件进行充分的冷却，使加工过程中工件的温度保持恒定，从而使材料去除过程更为稳定。SiC加工难度大，为了使加工深度大一些以方便检测，试验中一般采用的加工时间为2min；SiO_2的加工时间则定为1min即可。

通过对比可以发现，在相同的加工条件下，SiO_2的材料去除率要比SiC的大得多，如图4－36所示。根据阿列纽斯定律，SiC的化学活化能为484kJ/mol，SiO_2的化学活化能为15.7kJ/mol，SiC的化学活化能要比SiO_2的大得多，因此相同的条件下材料去除率要小很多。

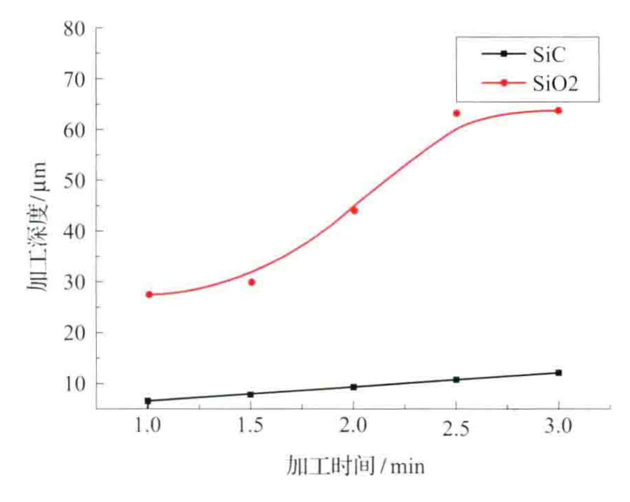


图4－36　SiO_2与SiC加工速度的对比

另外，通过与哈尔滨工业大学王波教授课题组之前关于电容耦合等离子体加工进行对比，可以发现在反应气体流量相同的条件下，电感耦合等离子体加工材料去除率要大得多，这要归功于Ar的电离激发机制，如4.3.2.1条中所述。这充分体现了电感耦合等离子体的快速加工优势。

（4）等离子体气体流量

试验采用单因素法，电感耦合等离子体用于原子发射光谱分析技术时外层Ar流量的安全工作范围是10～20L/min，在本节的试验条件下当流量低于13L/min时无法点火，因此外层Ar流量取13～20L/min，步距为1L/min，其他试验参数如表4－4所示，试验结果如图4－37所示。

从图4－37中可以看出，两种材料的加工深度都随着等离子体气体外层Ar流量的增加而减少。

表4－4　等离子体气体流量对加工深度影响试验参数

材料	中层Ar流量/（L/min）	CF_4流量/（mL/min）	加工时间/（min）	（O_2/CF_4）/%	加工功率/W	加工距离/mm
SiC	1	25	2	0	1000	10
SiO_2			1			

增大等离子体气体的流量可能会产生更多的自由电子，更加激烈的碰撞会产生更多的活性反应F原子与工件表面发生反应，从而增加材料去除率。但是，因为在该试验参数下，在该炬管几何尺寸的限制下，等离子体气体Ar的流量为13L/min时，反应气体已经被完全电离达到饱和状态。此时增加等离子体气体Ar的流量只会更多地消耗电源提供的能量用于自身的激发，反而会减少活性反应F原子的浓度，从而使得材料去除率降低。另外，随着等离子体气体流量的增加，工件表面温度在一定范围内保持稳定，这说明等离子体气体的冷却作用主要是针对外层炬管来说的，并不能对工件起到冷却的作用。

试验中，外层Ar流量较少时点火变得困难，较大时火焰容易熄灭并增加试验成本。为了保证炬管得到良好的冷却，一般采用的外层Ar流量为20L/min。

（5）辅助气体流量

试验采用单因素法，电感耦合等离子体用于原子发射光谱分析技术时中层Ar气体流量的安全工作范围是0.5～1.5L/min，因此试验中中层Ar取0.5～1.5L/min，步距为0.2L/min，其他试验参数如表4－5所示，试验结果如图4－38所示。

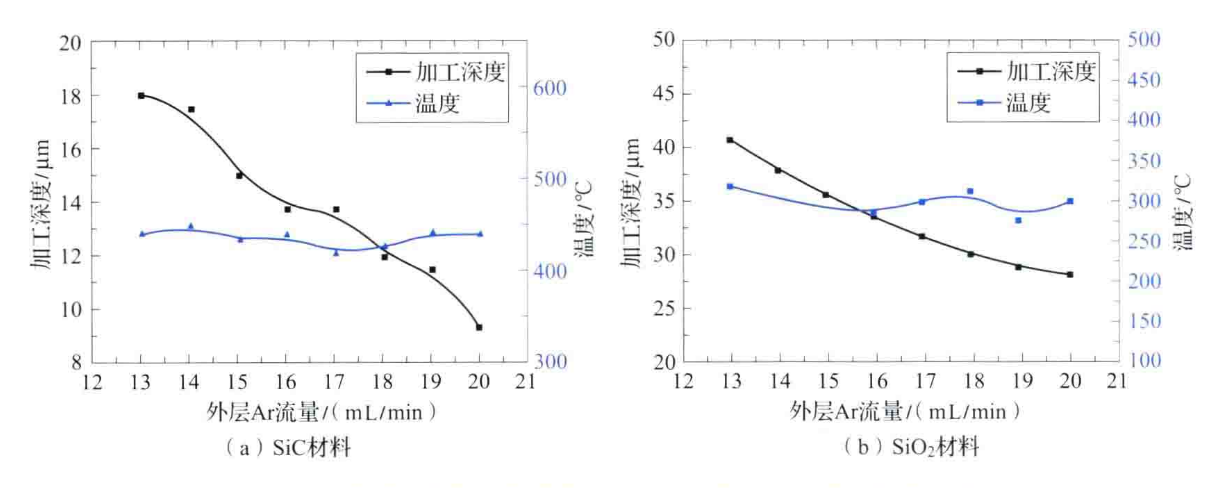


图 4-37 等离子体气体流量变化时加工深度和工件表面温度的变化

表 4-5 辅助气体流量对加工深度影响实验参数

材料	中层 Ar 流量/(L/min)	CF_4 流量/(mL/min)	加工时间/min	(O_2/CF_4)/%	加工功率/W	加工距离/mm
SiC	1	25	2	0	1000	10
SiO_2			1			

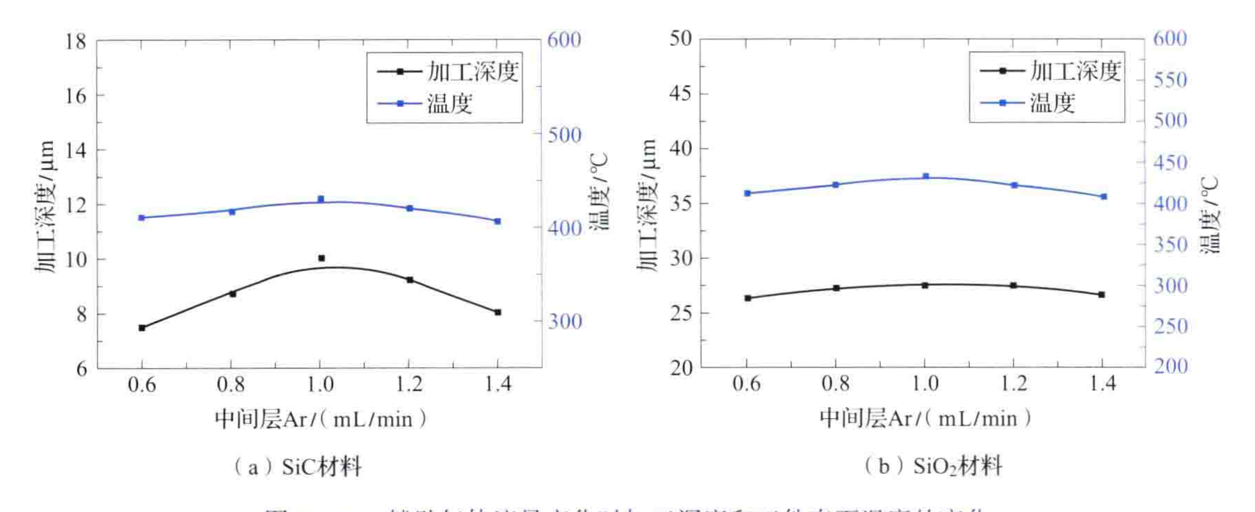


图 4-38 辅助气体流量变化时加工深度和工件表面温度的变化

从图 4-38 中可以看出，两种材料的加工深度和温度随着辅助气体中层 Ar 流量的增加，只有一个微小的先变大后变小的趋势，基本是稳定的，并无特别大的变化。

由 4.3.2.1 条中关于电感耦合等离子体速度的分析可知，辅助气体对气流影响很小，它可能只是用来“点燃”等离子体并提高等离子体火焰的长度。因此对加工深度的影响并不大。试验中，为了保证炬管得到良好的冷却并兼顾考虑材料去除率和试验成本，一般采用的中层 Ar 流量为 1L/min。

(6) 反应气体 CF_4 流量

等离子体加工中常用卤素类的 CF_4、SF_6、NF_3，因为它们容易控制、无腐蚀性且无毒。使用 SF_6 和 NF_3 时可以获得更高的材料去除率，因为它们的激发键能 SF_6(285kJ/mol)、

NF_3(277.8kJ/mol) 比 CF_4(485kJ/mol) 要小。但 NF_3合成困难、SF_6价格比较高，本试验采用的是 CF_4。

试验采用单因素法，试验初 CF_4流量取 10mL/min，以 5mL/min 为步距逐渐增加，当高到 45mL/min 以上时无法维持一个稳定的等离子体火焰，因此 CF_4 流量取 10 ~ 40mL/min，其他试验参数如表 4－6 所示，实验结果如图 4－39 所示。

表 4－6　反应气体 CF_4流量对加工深度影响实验参数

材料	外层 Ar 流量/(L/min)	中层 Ar 流量/(L/min)	加工时间/min	(O_2/CF_4)/%	加工功率/W	加工距离/mm
SiC	20	1	2	0	1000	10
SiO_2			1			

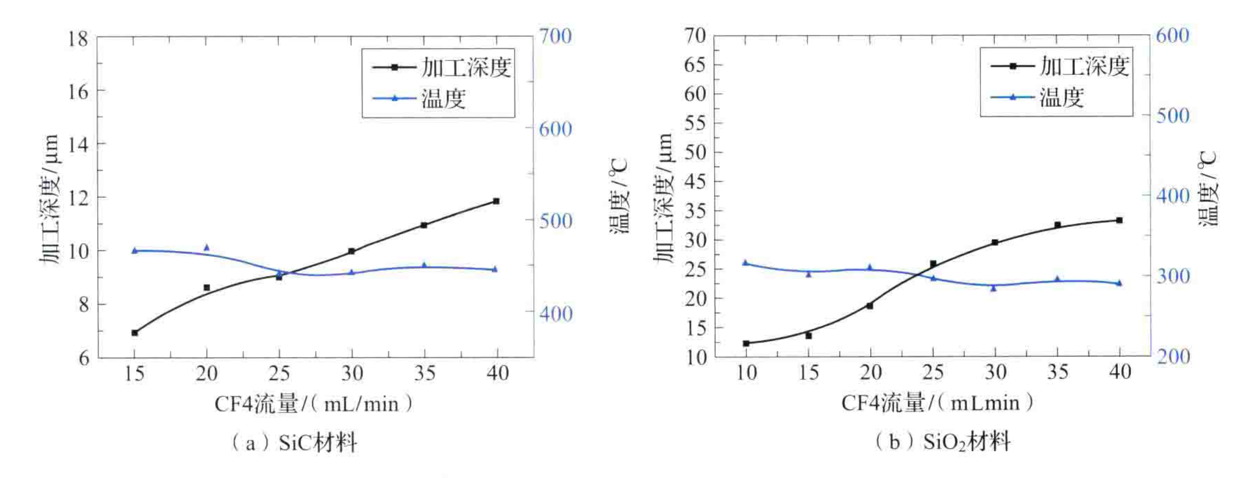


图 4－39　反应气体 CF_4 流量变化时加工深度和工件表面温度的变化

从图 4－39 中可以看出，两种材料的加工深度都随着反应气体 CF_4流量的增加而增加。温度在一定范围内变化不大，可见温度对于 CF_4流量不敏感。这说明化学反应产生的热量与等离子体产生的热量相比，可以忽略不计，影响工件的热状态的主要原因为等离子体电源。

关于 F 原子刻蚀 Si 的研究由来已久且较深入，常用来阐释等离子体的刻蚀原理。F 原子刻蚀 SiC 和 SiO_2的过程则要相对复杂一些，至今仍有很多未知之处，不过可以借鉴 F 原子刻蚀 Si 的一些分析思路。CF_4分子具有四面体结构，其激发态的能态皆为排斥性的，所以它可以被电子碰撞激发后而分解。此分解反应并不会一步直接完成。研究表明，在没有氧气的情况下，在适当的能量范围内，放电中电子碰撞分解 CF_4的方式为

$$e + CF_4 \rightarrow CF_4^+ \rightarrow CF_3^+ + F + 2e \tag{4-36}$$

$$e + CF_4 \rightarrow CF_3 + F + e \tag{4-37}$$

$$e + CF_4 \rightarrow CF_3 + F^- \tag{4-38}$$

$$e + CF_4 \rightarrow CF_2 + 2F + e \tag{4-39}$$

$$e + F^- \rightarrow F + 2e \tag{4-40}$$

$$CF_3^+ + F \rightarrow CF_2 + 2F \tag{4-41}$$

反应产物为活性 F 原子和一些 CF_x 基团。如式（4－36）所示反应可以产生充足的正离子和电子来维持放电。在没有氧气的情况下，如式（4－38）所示反应还伴有如式(4－40)所示反应。一些反应产物会发生复合反应如式（4－41）所示。这些反应都是很重要的产生 F 原子的源头。分解反应的同时也伴有复合反应，包括异类复合

$$CF_3 + F \rightarrow CF_4 \tag{4-42}$$

$$F + F \rightarrow F_2 \tag{4-43}$$

和均匀复合

$$CF_3 + F + M \rightarrow CF_4 + M \tag{4-44}$$

$$F + F + M \rightarrow F_2 + M \tag{4-45}$$

其中，如式（4－45）所示反应比较强。由以上分析可知在加工功率提供的能量充沛的情况下，随着 CF_4 流量增加，活性 F 原子变多，因此加工深度增加。

4.3.1.2 条中对等离子体加工的表面动力学过程进行了简单阐释。在此基础上，如果把 F 原子加工过程抽象为模型，并假设 F 原子首先物理吸附在工件表面然后才进行刻蚀，则针对此具体的动力学过程可以表述如下。

吸附与解吸附平衡时

$$\frac{d\theta}{dt} = K_{ap} n_{FS}(1 - \theta_p) - K_{dp}\theta_p = 0 \tag{4-46}$$

F 原子在表面的覆盖度为

$$\theta_p = \frac{K_{ap} n_{FS}}{K_{ap} n_{FS} + K_{dp}} \tag{4-47}$$

反应中，物理吸附的解吸附的活化能很低，因此 $K_{dp} \gg K_{ap} n_{FS}$，所以

$$\theta_p \approx \frac{K_{ap} n_{FS}}{K_{dp}} \tag{4-48}$$

可见 $\theta_p \propto n_{FS}$。这也可推测出，材料去除率是与表面附近气相中的 F 原子密度呈线性关系的。

放电过程中生成的 CF_x($x<4$) 等不饱和自由基团不会对工件进行主动刻蚀，它们会吸附在工件表面。不过在适当的条件下 CF_x 和一些非挥发性的反应产物可以在工件表面形成一层薄膜，对于 SiC 来说是 CO_xF_y 等氟碳聚合物层和 SiO_x、$Si_xC_yF_z$ 层等沉积物，对于 SiO_2 来说则是碳薄膜、Si_xF_y、SiO_xF_y 或 $SiC_xF_yO_z$ 等聚合物层。以 Si_xF_y 的形成为例，将该过程抽象成一个简单的动力学模型，由于 F 原子的输运过程被加工造成的表面减少而抵消，则在随加工表面一起移动的参照系 $x' = x - Et$ 中，$x' = 0$ 处的 F 原子通量为 0，此时

$$\Gamma'_F = -D\frac{dn_F}{dx'} - n_F E = 0 \tag{4-49}$$

可知

$$n_F = n_{F0}\exp\left(-\frac{Ex'}{D}\right) \tag{4-50}$$

式中：n_F——表面的 F 原子体积密度；

E——反应速率；

D——常数。

这说明粒子输运、表面中的反应或者更为复杂的过程都会使 Si_xF_y层产生。这个过程和去除反应过程形成竞争；另外这些聚合物层和沉积物很难被消除也不会自行分解，除非有离子撞击使得层发生溅射现象从而解吸附，因此这些聚合物层的形成会阻止刻蚀过程的继续进行。

沉积速度和参与反应的气体浓度有关。根据 C 原子和 F 原子守恒可知

$$\Gamma_{CF_4} = \Gamma_{CF_x} \tag{4-51}$$

$$x\Gamma_{CF_x} + \Gamma_F = 4\Gamma_{CF_x} + 4\Gamma_{SiF_4} \tag{4-52}$$

解出

$$E = \frac{\Gamma_{SiF_4}}{n} = \frac{\Gamma_F - (4 - x)\Gamma_{CF_x}}{4n} \tag{4-53}$$

式中：Γ_{CF_x}、Γ_F——吸附在表面的 CF_x自由基、F 原子的净通量；

Γ_{SiF_4}、Γ_{CF_4}——解吸附的 SiF_4、CF_4的通量。

当 CF_4流量增加的时候这个效应很可能增加。因为被引入等离子体炬的加工功率保持常数，这使等离子体粒子的比能量（specific energy）更低；同时，自由 F 原子浓度可能因为如式（4－43）和式（4－44）所示反应重新结合形成 CF_4而降低。当 $\Gamma_F < (4 - x)\Gamma_{CF_x}$时，刻蚀停止。因此，虽然在该实验参数下加工深度随着 CF_4流量的增加而增加，但并不意味着在加工功率一定的情况下，CF_4流量越大越好。加工过程中刻蚀与沉积效应的竞争胜负很大程度上与 F 和 CF_x的比例有关，即 F/C。另外沉积速度和表面温度有关。比如氧化硅在常温下不易分解，会阻碍刻蚀的继续，但是当温度升高到 300～400℃时可以分解，有助于加工反应的进行。

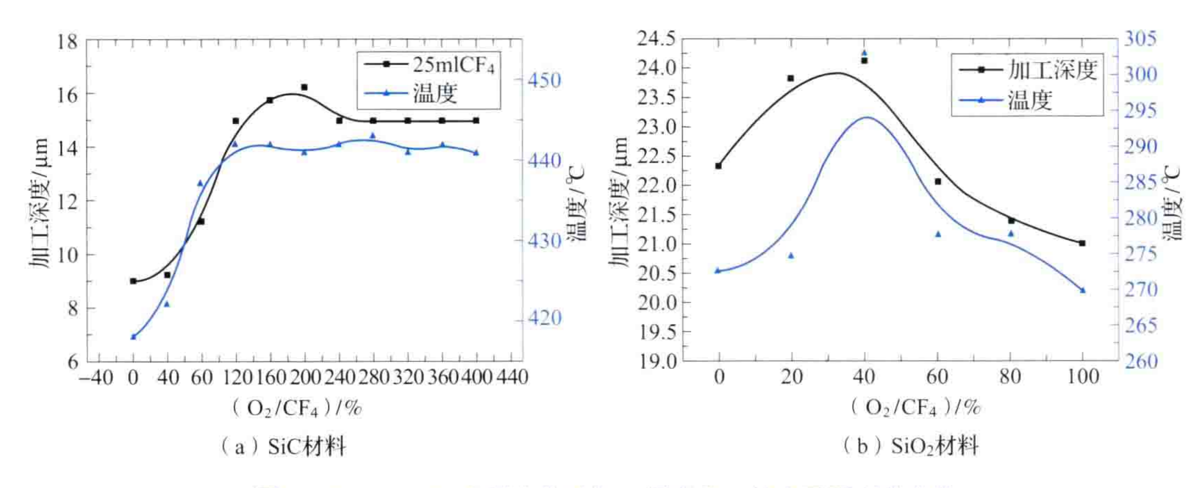
（7）O_2/CF_4比例

为了提高材料去除率，一些气体常被引入到反应中，本试验中加入的是 O_2。试验采用单因素法，对于 SiC，O_2/CF_4比例取 0～400%，步距为 40%；对于 SiO_2，O_2/CF_4比例取 0～100%，步距为 20%，其他试验参数如表 4－7 所示，试验结果如图 4－40 所示。

表 4－7　O_2/CF_4比例对加工深度影响试验参数

材料	外层 Ar 流量/(L/min)	中层 Ar 流量/(L/min)	CF_4流量/(mL/min)	加工时间/min	加工功率/W	加工距离/mm
SiC	20	1	25	2	1000	10
SiO_2				1		

对于 SiO_2，由图 4－40（b）可知，加工深度是气体组分 O_2/CF_4比例的函数。O_2/CF_4在 0～40% 范围内，随着 O_2流量的增加加工深度增加，40% 时达到最大，在 40%～100% 范围内随着 O_2流量的增加加工深度明显减低。联系上节的介绍，随着 O_2流量的增加，加工深度的增加的可信的解释有以下几种：O_2的一个作用可能就是阻碍如式（4－43）所示反应发生需要的“场所”表面，这个过程是常压下复合反应发生的最适宜的路径，这将使活性 F 原子与 CF_3 的重新结合减少，从而能使 F 原子保持活性，虽然因为这两种粒子碰撞的机会比较小使得这个效应并不是很显著。而且，由于反应过程中会在工件表面生成



（a）SiC材料

（b）SiO_2材料

图 4-40 O_2/CF_4比例变化时加工深度和工件表面温度的变化

碳薄膜、SiCxFyOz 等聚合物层，其厚度受 O_2 浓度和其所处温度的影响。这些层会阻滞 F 原子进一步的气相反应，O_2 可以与沉积层发生反应，从而相对的增加了 F 原子的浓度。例如，氟碳聚合物层可以与 O_2 反应形成挥发性的反应产物：CO、CO_2、COF_2，因此，当缺乏 O_2的时候，这些沉积层会捕捉或者重组 F 原子。因此，O_2的功能可能是通过将碳氟层转变成挥发性产物，以除去这些“陷阱点”。但是需要注意的是，O_2与碳氟层反应生产的 SiO 和 SiO_2都是不挥发的，因此一层硅基薄膜会留在工件表面，而这些是 O_2无法去除的，因此这个作用不是 F 原子增加的最主要的原因。另觅原因，由于基态 O 原子和亚稳态 O 原子都不和 CF_4反应，因此可以排除 O_2直接和 CF_4反应生成 F 原子。更可能的过程则是 O_2与不饱和基团 CF_x反应

$$CF_3 + O_2 \rightarrow COF_2 + OF \tag{4-54}$$

$$CF_3 + O_2 + M \rightarrow CF_3O_2 + M \tag{4-55}$$

如式（4-54）所示反应生成的 OF 是高活性的，可以通过

$$CF_3 + OF \rightarrow COF_2 + 2F \tag{4-56}$$

$$OF + OF \rightarrow O_2 + F_2^* \rightarrow O_2 + 2F \tag{4-57}$$

被转化为 F 原子，其中 F_2^* 为激发态；而（4-56）中的 CF_3O_2可以直接通过与多种自由粒子反应产生 F 原子

$$CF_3OO + O \rightarrow COF_2 + O_2 + F \tag{4-58}$$

同时 O_2被电子激发产生的 O 原子也可以直接与 CF_X反应释放出 F 原子

$$CF_3 + O \rightarrow COF_2 + F \quad CF_2 + O \rightarrow CO + 2F \quad CF_2 + O \rightarrow COF + F \tag{4-59}$$

这些过程生成 F 原子，同时被 O_2消耗的不饱和基团还会带来另一个效应就是抑制聚合物层的形成。当 O_2浓度较高的时候，反应速率减低的原因分析主要有三点：首先，一定条件下会与 SiO_2反应并在工件表面生成无机钝化层，此时刻蚀速率主要由钝化层厚度控制而不是活性反应 F 原子的浓度。另外，加工过程中某些反应中间产物中可能含有 O_2，O_2浓度的增加会增加逆向化学反应速率，抑制加工。其次，O_2过多时还能对电子能产生影响。在纯 CF_4中的电子能是（6~8.3）eV，而在纯氧中则是（4.5~6）eV。如式（4-37）和式（4-39）所示反应中 CF_4的分解速率是电子能的函数，在纯 CF_4放电中电子能级更大，既然电子分解 CF_4是产生 F 原子非常重要的过程，因此 O_2增加使得电子能减少，从而减少

了F原子浓度。另外，因为稀释作用，过多的O_2会稀释活性反应F原子的浓度。这些都会导致材料去除率降低。

对于SiC，由图4－40（a）可知，加工深度也强烈的受O_2/CF_4比例的影响。O_2/CF_4在0～200%范围内，随着O_2流量的增加加工深度增加，200%时达到最大，200%之后有一个微小的降低，在200%～400%范围内加工深度基本保持稳定。

分析可知O_2的加入可以使F原子的含量增加。有研究指出加入O_2后的材料去除可以看做一个分为两步的反应。第一步是O_2可以使工件表面氧化，移除SiC中的C成分，使SiC转化为更容易与活性F原子反应的SiO_2；第二步为SiO_2在伴有挥发性反应产物形成的情况下被F粒子去除，可以用来描述这个过程的方程式有

$$SiC + 4O \rightarrow SiO_2\uparrow + CO_2\uparrow \tag{4-60}$$

$$SiO_2 + 4F \rightarrow SiF_4\uparrow + O_2\uparrow \tag{4-61}$$

实际在表面发生的反应原理要比这复杂得多，现在还无法完全被掌握。

材料去除率曲线是O_2/CF_4的函数的原因可以解释为：与SiO_2的情形相类似，一方面在等离子体放电中O_2扮演的角色是CF_x自由基形成COF_2的催化剂，它可以抑制等离子体中CF_4的重新组合，使自由的O自由基可以生成；另一方面，由于等离子体作用过程中SiC表面被不断氧化，因此刻蚀时至少包含两个相互竞争的过程，即F原子对表面的刻蚀和表面SiO_x层的形成。这样考虑的话，反应速率可以表示为

$$R_{eff} = R_{etch} - R_{Ox} \tag{4-62}$$

式中：R_{eff}——整体反应速率；

R_{etch}——根据刻蚀条件，F对由SiC和SiO_2组成的混合层的刻蚀速率；

R_{Ox}——相应氧化过程的反应速率。

如果氧化作用也可以表示成如阿列纽斯方程式的形式，则此时的反应速率可以表示为

$$R_{eff} = C_{etch}\, j_F \exp(-E_{a,etch}/(k_B T_S)) - C_{Ox}\, j_O \exp(-E_{a,Ox}/(k_B T_S)) \tag{4-63}$$

式中：$C_{etch/Ox}$——对于特定的反应为速度常数；

$j_{F/O}$——F、O原子的电流密度；

$E_{a,etch/Ox}$——表面刻蚀、氧化的活化能。

因此刚开始时随着O_2/CF_4增加，更多的自由F原子产生，材料去除率增加并达到最大；当O_2/CF_4超过200%后，混合物中O_2比较富足，提供的电子能主要被O_2形成激发物种或者分解产物而消耗，由电子撞击产生的自由F变少了，如式（4－62）所示反应受到抑制，因此材料去除率略有下降；当F和O的激发都达到饱和之后，材料去除率基本维持稳定。

两种材料温度的变化和加工深度的变化基本一致，与不加入O_2时相比温度有所提高，不过温升很小，只有20℃左右。这可能是因为O_2的加入使反应变得剧烈和复杂，化学反应放热增加。同加工功率相比，这个温升是很小的，这再次说明化学反应产生的热量与等离子体产生的热量相比很小，影响工件的热状态的主要因素为等离子体电源。反过来温度的升高，使F或O原子和工件表面的反应得到了热促进，CO、CO_2和COF_2等挥发性刻蚀产物的数量增加，因此上节所述的抑制刻蚀的碳富含层或者聚合物层的形成的可能性会变小；工件温度的升高也支持之前形成的聚合物层的解吸附。因此，等离子体表面反应可以更容易地进行。

但是加入O_2之后，会发现电感耦合等离子体放电有波动，监测光谱与电源功率亦有

微小波动，放电稳定性下降。

（8）均匀去除

针对电感耦合等离子体射流加工系统经过了一系列的试验研究，目前获得了稳定加工时的试验参数和电感耦合等离子体的射流加工能力范围：对于 SiC 材料的加工，最大去除率可以达到 $3mm^3/min$。对于 SiO_2 材料的加工，用于快速去除时最大材料去除率可以达到 $37mm^3/min$，用于微小修琢时最小加工深度分辨率可以达到 15nm/s。

电感耦合等离子体的优势是其较高的材料去除率，因此在实际工程应用中，常常用于大型光学元件表面的快速、大面积的均匀材料去除。

正如任何蚀刻等离子体的直径总是小于被刻蚀的材料表面，只是刻蚀具有高斯型的坑或沟槽截面是没有用处的。要从一个面积比较大的元件表面等深度的移除一层材料（即均匀去除），常规的想法就是以恒定的速度在工件表面进行扫描，这样可以使得等离子体在表面上的每一点停留相同的时间。最简单的扫描图案就是使等离子体在工件表面以锯齿形或蛇形的路径运动。

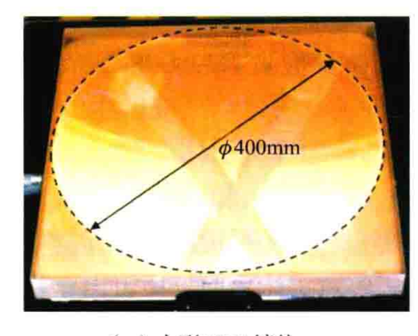
4.3.2.3 电感耦合等离子体的工艺优化

针对等离子体加工造成的粗糙度恶化问题，RAPT 公司提出了如图 4－41 所示的集成制造过程（Integrated Manufacturing Process，IMP），在电感耦合等离子体修形与测量的迭代过程中添加一个保形机械抛光的步骤，通过小去除保形精抛来保证电感耦合等离子体加工后的表面粗糙度。

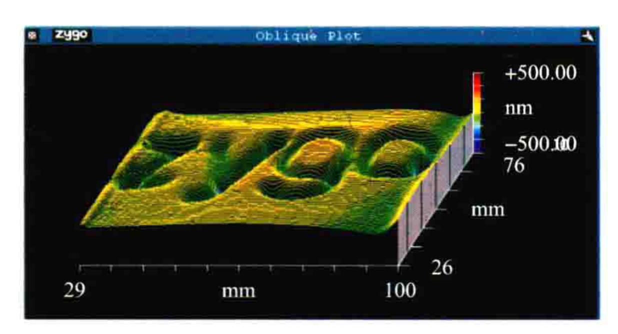


图 4－41　电感耦合等离子体技术的集成加工过程

采用电感耦合等离子体技术对直径 400mm、曲率半径 3m 的超低膨胀玻璃 ULE（Ultra Low Expansion）凹球面进行加工，经过“三次 RAP 迭代—机械抛光—两次 RAP 迭代”的过程，面形误差从原始的 2300nm PV（373nm rms）降低至 230nm PV（31nm rms），如图 4－42（a）所示。此外，为了展示 RAP 不同尺度的加工工具及其对刻蚀过程的控制能力，在熔石英表面加工出如图 4－42（b）所示的字符图形。



（a）大型 ULE 镜片



（b）字符图形

图 4－42　RAP 的典型加工结果

4.3.3　电容耦合等离子体加工技术

电容耦合等离子体加工技术包括 20 世纪 90 年代由日本大阪大学（Osaka University）提出的等离子体化学蒸发加工技术和 2006 年由哈尔滨工业大学提出的大气等离子体加工技术。两种加工技术均采用电容耦合的方式。在射频电场的作用下，采用电容耦合的方式在加工区产生含有高活性粒子的等离子体，等离子体中的活性粒子与工件表面原子发生化学反应并生产挥发性物质，从而达到去除材料的目的。该方法加工效率与传统的机械抛光相当，由于原理基于化学反应、不存在机械力接触，因而避免了亚表层损伤的产生。电容耦合等离子体加工的优点是可以根据要求设计不同分辨率的等离子体炬；高分辨率加工时的表面质量好、加工精度高，适于进行微结构的加工；加工过程中的温度比较低。不过目前加工硅基材料，单位时间的加工深度为几个微米。虽然较常规的加工方法已经有很大进步，但面对大型超精密硅基材料光学表面的加工，其材料的去除率还无法完全满足要求。

4.3.3.1　电容耦合等离子体的产生

电容耦合等离子体的加工方法是将 13.56MHz 或 150MHz 的射频电源施加于不同类型的电极上，电极表面覆盖有绝缘涂层，可以避免由二次电子发射造成的弧光放电，从而通过稳定的介质阻挡放电在加工区域激发产生含有高密度活性原子的等离子体，实现材料的去除，如图 4－43 所示。

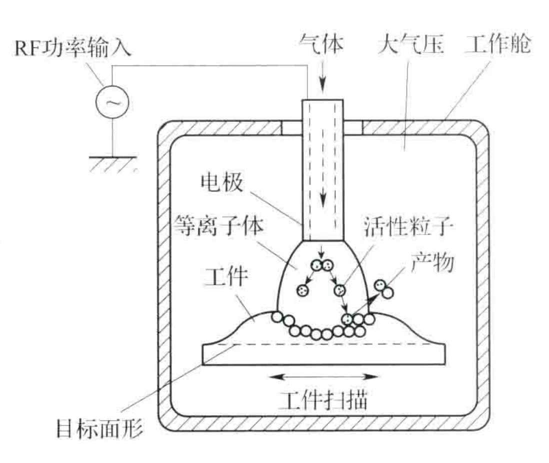


图 4－43　电容耦合等离子体加工原理

4.3.3.2　电容耦合等离子体加工试验

（1）不同电极下的去除特性

电容耦合等离子体加工过程中可以使用不同形状的电极作为装置进行加工，主要有以下三种形状。

①管状电极：在对管状微电极的去除特性研究试验中发现，去除速率为 9.98mm^3/h 时，表面粗糙度随着去除深度的增加而增加，在去除深度为 6μm 时保持不变。在去除速率为 0.79mm^3/h 时，表面粗糙度数值基本保持与原始表面粗糙度一致，具体关系如图 4－44 所示，R_r 表示管状微电极加工去除速率。

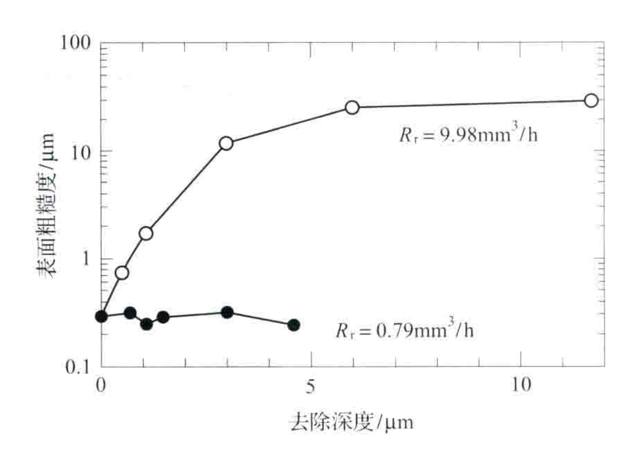


图 4－44　表面粗糙度随管状微电极去除深度的变化

中空管电极：面向微小复杂结构光学表面的中空管电极 PCVM 加工，采用了外径为 0.5mm，内径为 0.2mm 的中空微电极，形状如图 4－45 所示，在电极端部产生局部等离子体进行扫描加工，加工 12mm × 12mm 的区域，PV 形状精度为 40nm，平均的表面粗糙度数值为 0.58nm，如图 4－46 所示。

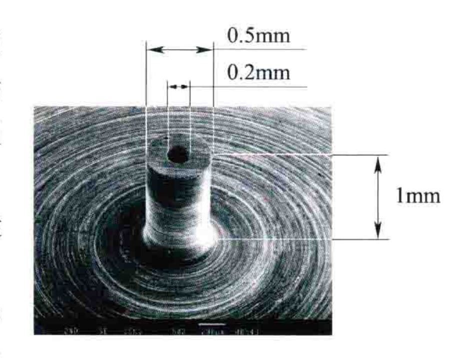
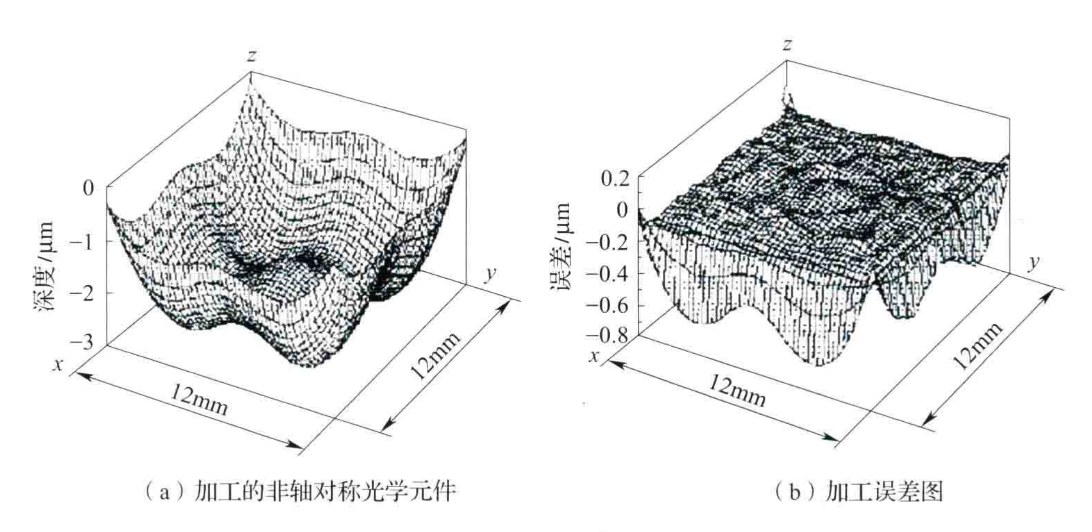


图 4－45　微电极端部的 SEM 图像

圆柱形旋转电极和中空管电极结合：将直径为 ϕ200mm 的圆柱形旋转电极和直径为 ϕ1mm 的中空管电极相结合（如图 4－47 所示）的加工方法来提高石英晶片厚度分布的均匀性（见图 4－48），用圆柱形旋转电极修正空间长波长分量的厚度误差，用中空管电极来精修剩余的厚度误差，两步修正的去除深度分别为 250nm 和 40nm，石英晶片的厚度分布由 108.3nm PV 提高到 14.4nm PV，并提高了石英晶体振荡器的性能。



（a）加工的非轴对称光学元件　　（b）加工误差图

图 4－46　加工试验结果

常用旋转电极和管电极相结合的加工方法对硅基材料的平面或非球面进行修形。如图 4－49 所示，采用旋转电极作为等离子体发生装置，反应气体分子被高速旋转的电极带入电极与工件之间的间隙中，形成高速的等离子体流。电极的高速旋转可以实现活性气体的高效供给并且有利于反应产物的快速排出，同时可以带走加工区域产生的热量，使电极充分冷却、可以承受较高的射频功率，从而产生较高的加工效率。实际加工过程中，通常采用直径为 200mm 的旋转电极，对单晶硅的去除函数半高宽约为 13mm 左右，适用于大空间周期面形误差的修正。如图 4－50（a）

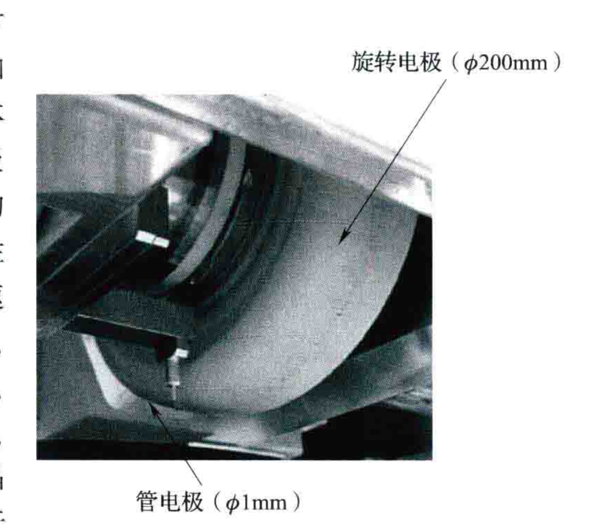


图 4－47　加工机床旋转电极和管电极图片

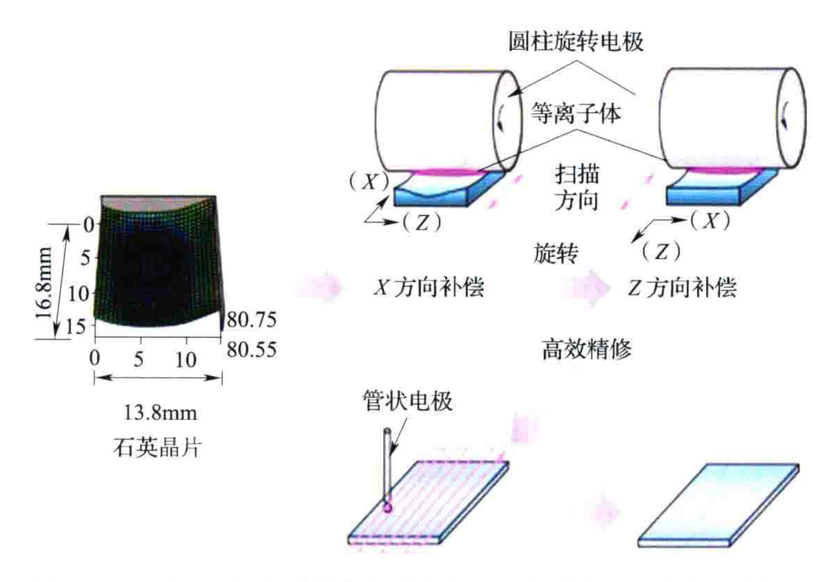


图4-48　旋转电极和管状电极结合提高石英晶片厚度分布的均匀性

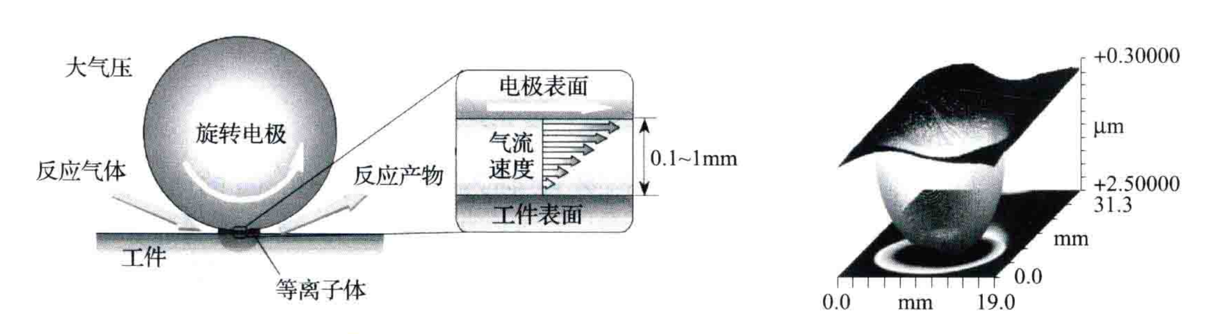
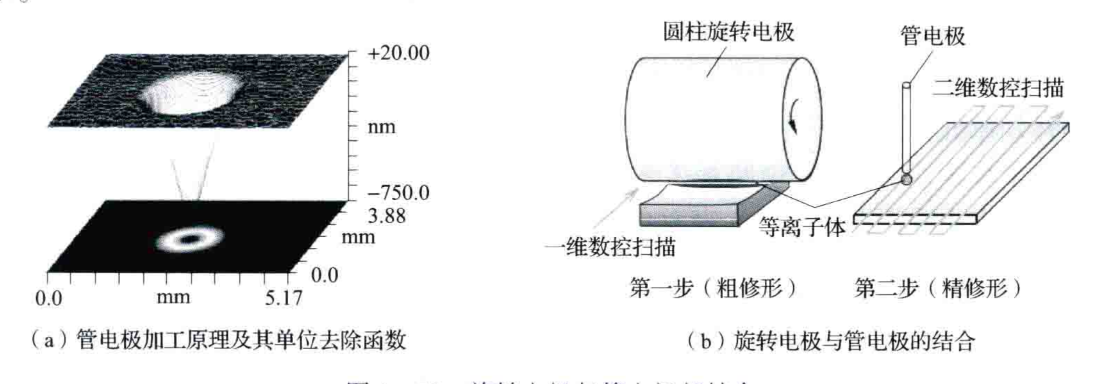


图4-49　旋转电极加工原理及其单位去除函数

所示，采用管电极时，将气体通入管电极的末端，在管电极上施加射频电压后，等离子体在电极前端产生，活性反应原子通过电极内径喷射到工件表面。由于大气压的作用，等离子体区域被局限于电极周围，因此采用管电极具有较高的加工分辨率。根据加工分辨率的要求设计了不同尺寸的管电极，其中，外径1mm的管电极对单晶硅的去除函数半高宽约为0.86mm，适用于小空间周期面形误差的修正。旋转电极的去除率通常为管电极的10倍以上，而管电极的加工分辨率为旋转电极的1/10以下。因此，为了兼顾加工效率和精度，PCVM通常先用旋转电极进行大去除量的粗修形，再用管电极进行精修形，如图4-50（b）所示。



（a）管电极加工原理及其单位去除函数　　（b）旋转电极与管电极的结合

图4-50　旋转电极与管电极相结合

（2）电极的旋转速率对去除速率的影响

试验中，选择的电极旋转速率分别为1000r/m，2000r/m 和3000r/m。分别选择去除部位正交的两个方向对去除量进行描述，如图4－51所示，在速率为3000r/m 的情况下，两个方向上的去除率均为最小。大致的关系可以表示为电极的旋转速率与去除量成反比。

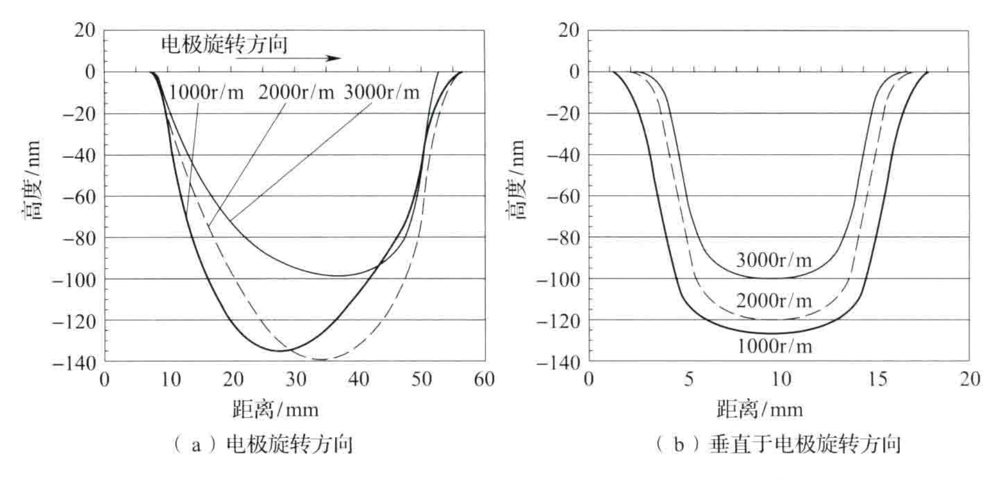


图4－51　电极的旋转速率与去除横截面轮廓关系

（3）加工材料对去除速率的影响

表4－8中：（a）He: SF_6 =95: 5，旋转速率31.4m/s，工件为ϕ30mm 的球面，加工间隙为100μm 以及射频功率为450W（570W/cm^2）；（b）He: SF6 =90: 10，旋转速率63m/s，工件尺寸为ϕ120mm ×1mm，加工间隙为300μm 以及射频功率为600W（8kW/cm^2）。在这两种试验条件下对去除率进行分析，结果如表4－8所示。

表4－8　不同加工材料的去除率

材料	去除率/（mm^3/min）（μm/min①）
（a）熔融石英	13.3　（170）
硅（单晶）	7.4　（94）
钼（多晶）	2.8　（36）
钨（多晶）	2.5　（32）
碳化硅（多晶）	0.5　（6.4）
（b）金刚石	0.2　（2.5）

①加工材料为ϕ10 mm 的棒材。

（4）加工 SiC

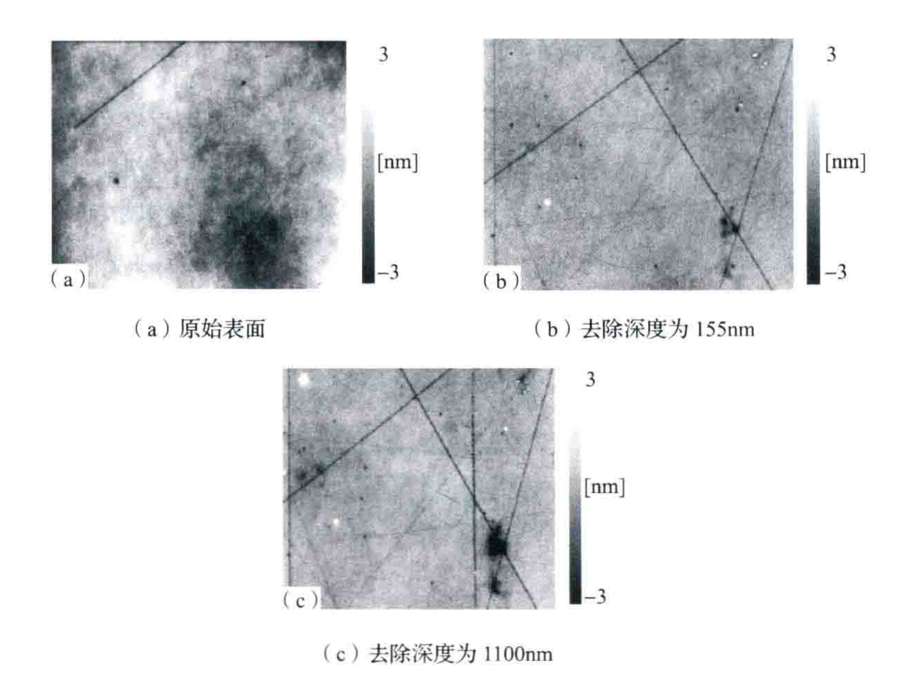
对4H－SiC（0001）基片进行加工开始于2006年。4H－SiC（0001）主要应用于下一代半导体功率元件，由于SiC具有优良的导热性能、宽范围的能带间隙、高的击穿电场及良好的化学稳定性。图4－52为加工SiC基片中Si面表面形貌的变化。

随着加工去除深度的增加，表面会出现凹坑和划痕，在图4－79（c）中凹坑的密度与基片上原始缺陷密度基本相等，密度为10^5/cm^2。凹坑和划痕的形成是由于氟原子在基片的原始缺陷点处的选择性刻蚀。

（5）加工单晶硅材料（晶向为（100））

在加工单晶硅（110）的平面反射镜时，与传统机械抛光（平面度158nm PV）相较，

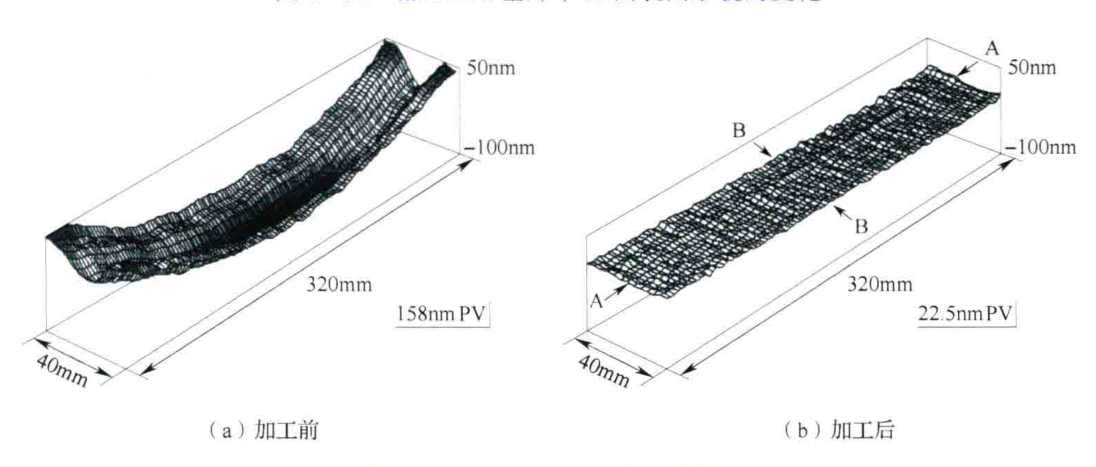
其平面度提高到22.5nm PV，并实现了表面无损伤加工，如图4－53加工X射线平面反射镜所示。



（a）原始表面　　（b）去除深度为155nm

（c）去除深度为1100nm

图4－52　加工SiC基片中Si面表面形貌的变化



（a）加工前　　（b）加工后

图4－53　加工X射线平面反射镜

4.3.3.3　电容耦合等离子体辅助抛光SiC

由于加工SiC时Si和C的刻蚀速率不一致和电容耦合等离子体的各向同性刻蚀特性，使其在原子级加工的平坦化能力比抛光加工要低。2011年提出的等离子体辅助抛光加工技术如图4－54所示，它结合了电容耦合等离子体加工和抛光加工的优异性能，在等离子体辅助抛光加工过程中，通过等离子体作用在硬质材料表面形成一层软化层，在随后的抛光加工中优先去除表面的软化层。

这种加工方法利用高纯He气通入超纯水携带水蒸气，通过质量流量计（MFC）来控制He气的流量，通过露点仪（DPM）测量高纯He气中水蒸气的浓度，由射频电源产生的等离子体激发电离水蒸气产生具有高氧化能力的OH自由基（发射光谱波长为$\lambda=$281nm和306nm），SiC表面被电离出的OH自由基氧化。

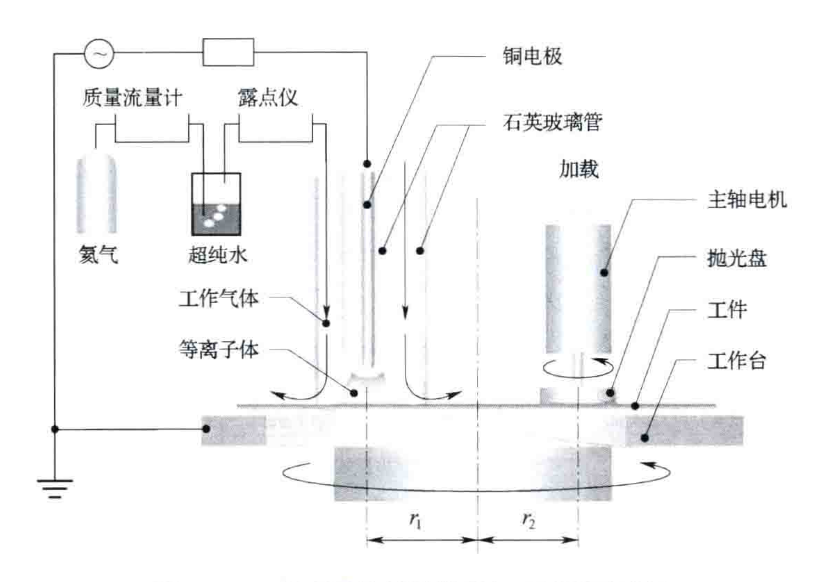


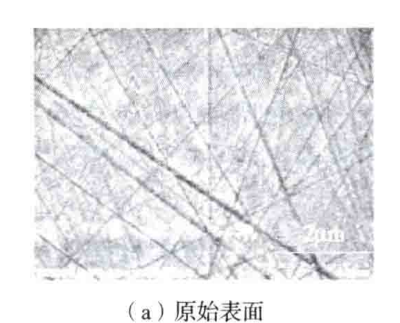
图 4－54　等离子体辅助抛光加工原理示意图

加工参数如表 4－9 所示。

表 4－9　PAP 加工试验参数

研磨材料	CeO_2
粒度/μm	0.5
载荷/g	30
废气	$He + H_2O$（2.04%），1.5L/min
射频功率/W	7
基片旋转速度/（r/m）	100
研磨垫旋转速度/（r/m）	3700

图 4－55 和图 4－56 为 SiC 的 SEM 图片，通过 XPS 对 OH 自由基氧化的表面元素进行分析，结果表明表面存在 Si—O 键和 Si—C—O 键，等离子体氧化加工后表面硬度从原始的 37.4GPa 下降至 4.5GPa，因此，SiC 氧化的表面在后续抛光过程中很容易去除，从而可以获得原子级的平坦化表面。电容耦合等离子体加工 4H—SiC（0001）去除速率为 80nm/h，用 CeO_2抛光加工后的表面粗糙度达到 0.2nm。



（a）原始表面

（b）超纯水等离子体加工表面

图 4－55　SiC 表面 SEM 图

4.3.3.4　电容耦合等离子体的工艺优化

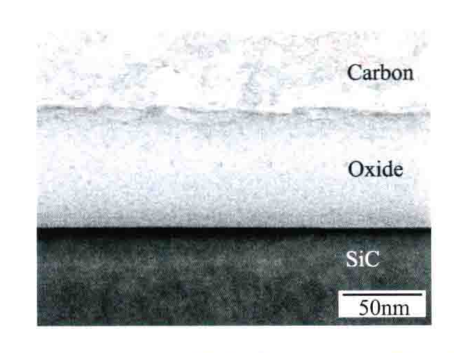


图 4－56　超纯水等离子体加工 SiC 基片截面透射电镜图片（加工时间 1h）

采用上述两种电极结合的加工方法可以修正空间波长大于 1mm 的面形误差，而对于空间波长在 0.1～1mm 的面形误差以及粗糙度的高频部分，大阪大学采用弹性发射加工技术进行修正，该方法是一种基于工件表面与超细颗粒之间化学反应的超精密加工方法，原理如图 4－57 所示。

该方法将超纯水与直径为 0.01～2μm 的超细颗粒粉末的混合液通过喷嘴喷射到工件表面，当超细微粒与工件表面的距离接近 1μm 时，二者的表层原子就会在界面上形成化学键，通过水流的黏性力作用使工件的表层原子脱离，从而实现原子级别的去除。该方法可以获得原子级别的表面粗糙度，但是去除率极低，因此非常适合作为电容耦合等离子体的后续工序，提高加工精度。

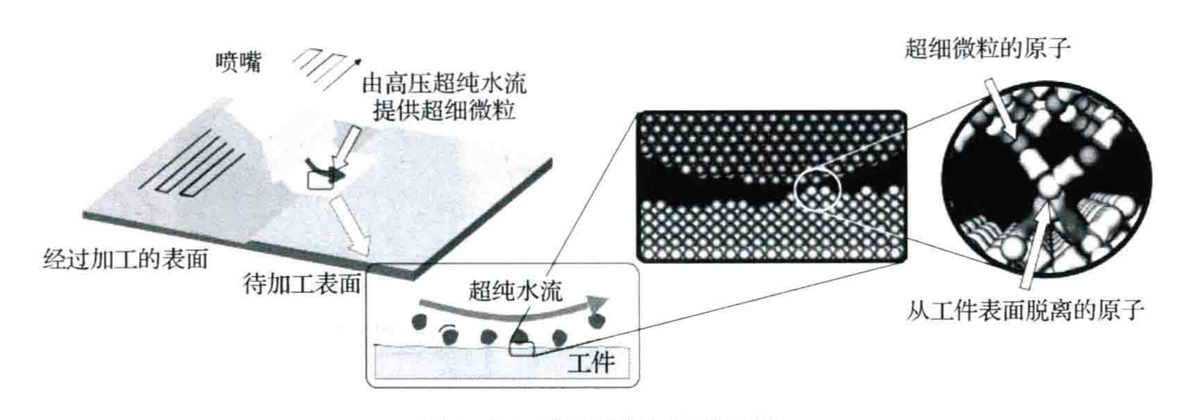


图 4－57　弹性发射加工的原理

针对加工深度随时间非线性变化造成的加工误差，电容耦合等离子体的补偿方法与电感耦合等离子体类似，如图 4－58 所示，将目标去除量看作是一系列厚度为 ε 的薄层，ε 等于或小于期望的面形精度，每次等离子体迭代加工时仅去除最表面的一个薄层，即可保证加工精度。

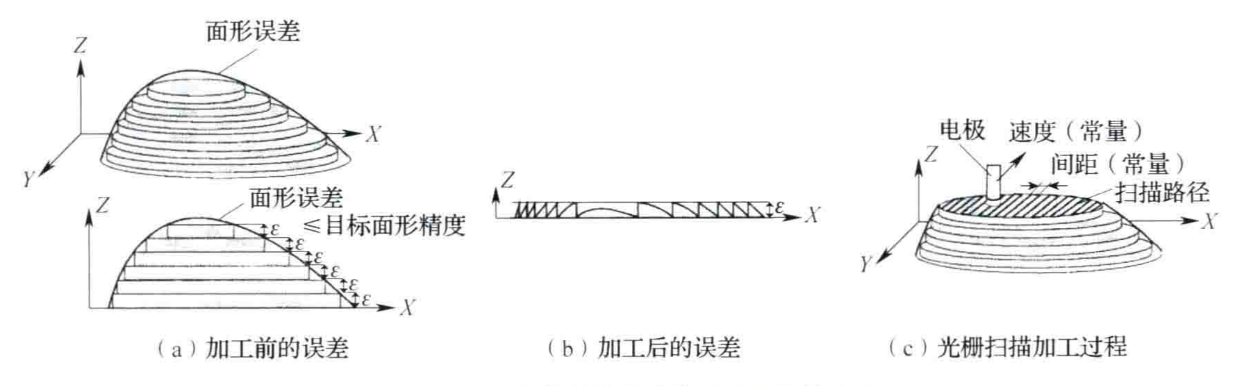
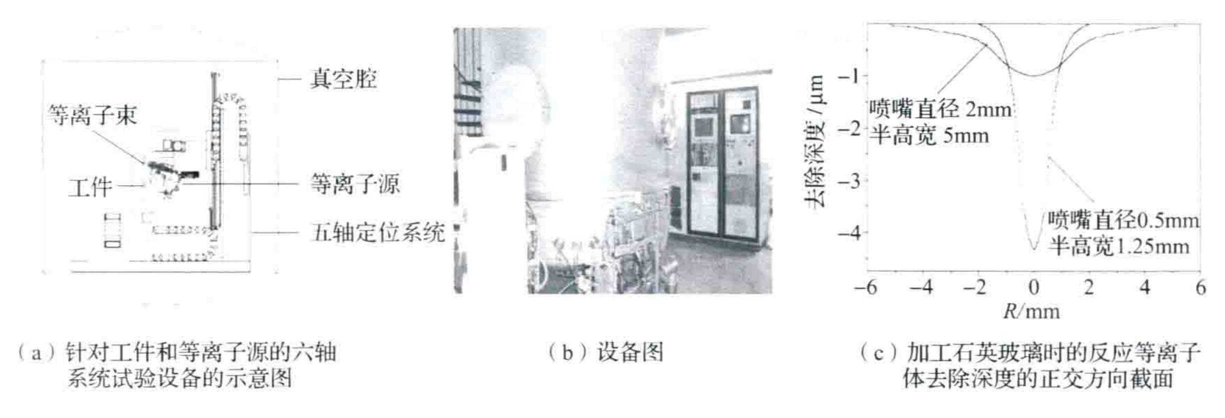


图 4－58　电容耦合等离子体的误差补偿方法

4.3.4 微波等离子体加工技术

微波等离子体加工技术是一种基于大气压等离子体辅助化学蚀刻或沉积的表面加工技术。作为光学元件表面加工和修整的一种非传统加工方法，莱布尼兹 – Institutfür Oberflachen Modifizierung（IOM）已经有 15 年的研究时间。最初的微波等离子体刻蚀加工是 20 世纪 90 年代中期与卡尔蔡司合作在真空环境中开始研究，在 2001 年该种加工技术扩展到大气压环境下，避免了成本较高的真空设备，采用以微波电源激发的等离子体射流化学刻蚀设备，频率为 2.45GHz，电源功率范围在 100 ~ 200 W 之间，工作压力范围为 10 ~ 600mbar[1]，如图 4 – 59（a）和（b）所示。等离子体加工设备，加工石英玻璃的尺寸为 $\phi80 \sim \phi160$mm，加工硅基材料的最大去除速率可以达到 50mm^3/min，可加工材料有 Si、SiO_2、SiC 等，图 4 – 59（c）为加工石英玻璃图。使用子孔径的等离子体射流和数控多轴运动系统来加工曲面，能够在大的加工去除速率和高的空间分辨率条件下，加工深度非球面和自由曲面，设备如图 4 – 59（b）所示。依靠等离子体产生的活性原子和表面之间的化学反应，在加工过程中不会在表面和亚表面引入任何的损伤。还有一种激发方式是将微波电源和射频电源相结合的方式，两种加工方式将在后面通过试验进行比较。电源确定性沉积氧化硅层和后续使用离子束抛光是另一种基于等离子体射流表面加工技术，这种新技术可扩展加工材料的范围。



（a）针对工件和等离子源的六轴系统试验设备的示意图　（b）设备图　（c）加工石英玻璃时的反应等离子体去除深度的正交方向截面

图 4 – 59　等离子体射流化学刻蚀

4.3.4.1 微波等离子体的产生

等离子体加工原理及装置如图 4 – 60 所示。依靠等离子体产生的活性原子和表面之间的化学反应，在加工过程中不会在表面和亚表面引入任何的损伤。加工过程中有 N_2 注入来将等离子体与周围大气隔离开。目前，该种方法用于 SiC 的光学加工和单点误差修正，微波激励方式下当工件被预热到 350℃ 时可以获得最大去除率 1.5mm^3/h；射频激励方式下最大去除率可以达到 2mm^3/h；该方法可以获得面形误差小于 1nm RMS 的 SiC 镜片。采用半高宽为 0.41mm 的等离子体射流工具在 SiO_2 表面加工空间波长 0.5mm、7nm PV 的正弦结构。

1　1mbar = 100Pa。

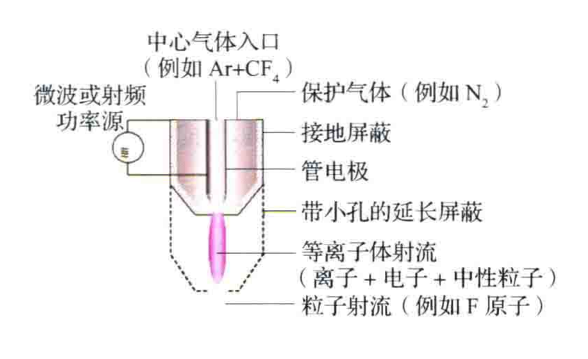


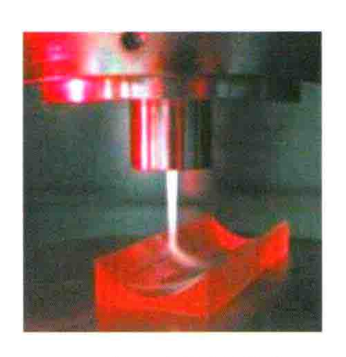


图 4－60　等离子体加工原理及设备图

微波等离子体的方法采用同轴电极等离子体炬，内电极为中空的管状、前端为锥形喷嘴，如图 4－61（a）所示。将等离子体气体与反应气体混合后通入内电极，并将频率为 2.45GHz 的微波电源或频率为 13.56MHz 的射频电源施加于内电极上，喷嘴尖端产生的高强电场就会使气体受激发形成等离子体射流，如图 4－61（b）所示。进行加工时，在接地的外电极中通入保护气体 N_2，使等离子体与外界环境隔离，并且可以选用不同尺寸的喷嘴来约束和稳定等离子体射流。当施加功率较大时，有必要使用带小孔的延长屏蔽来隔离微波辐射。此时，加工区域的尺寸可以通过延长屏蔽上小孔的孔径来控制。



（a）等离子体射流



（b）带延长屏蔽的射流

图 4－61　等离子体射流加工

为了满足不同尺度面形的高效、高精度加工，微波等离子体设计了三种不同孔径的等离子体射流炬，如图 4－62 所示，去除函数 FWHM 和去除率分别覆盖了 0.2～12mm 和 $5\times10^{-5}\sim30\text{mm}^3/\text{min}$ 的范围。

等离子体源类型	高功率型	紧凑型	微型
重量/kg	15	2	0.1
最大微波功率/W	600	150	60
半高宽/mm	2～12	0.2～2	0.2～1
去除速率/（mm^3/min）	30	1	0.1

图 4－62　不同加工分辨率的等离子体源

4.3.4.2 微波等离子体加工试验

（1）加工石英玻璃试验与分析

微波等离子体所采用的等惰性气体为 Ar 和 He，反应气体有 NF_3，CF_4，SF_6，O_2。试验的加工参数如表 4－10 所示。

表 4－10 试验参数

项目	试验数据
加工方式	微波等离子体电源激发等离子体射流
微波电源频率	2.45GHz
加工压力范围	10～600mbar
加工石英玻璃尺寸	ϕ80～160mm
微波电源功率范围	100～200W
等离子体激发气体	Ar
激发气体流量	0.2～0.6sl/min
反应气体	CF_4，SF_6，O_2
反应气体流量	SF_6：0.1～0.3slm[①]；O_2：0.1～0.3slm
工件加工距离	10～50mm
加工最大去除速率	Si：50mm^3/min，SiO_2：30mm^3/min
加工面形误差	1～2μm
加工后表面粗糙度	50－100nm（rms）

微波等离子体采用了两种工作模式，分别是接触模式（特征是等离子体直接和工件表面接触，如图 4－63 所示。去除轮廓形状是由一个窄的和宽的高斯型曲线的叠加）和接近模式。（特征是等离子体区和工件表面不直接接触，从等离子体中出来的 F 自由基与基体表面发生反应。去除轮廓是单个高斯曲线。）

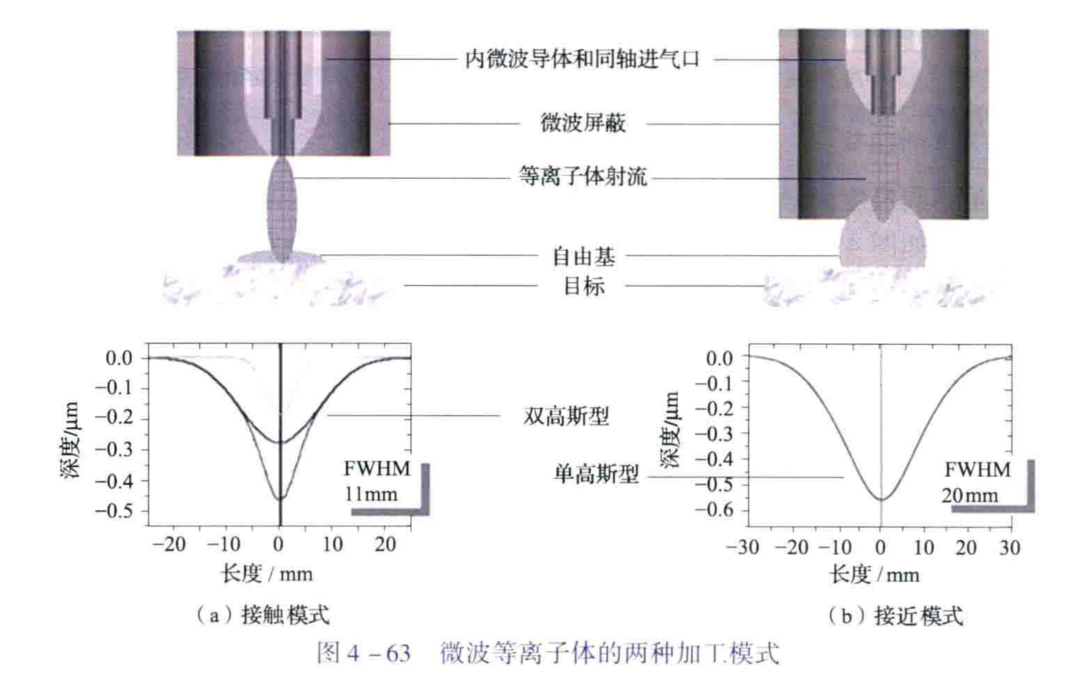


图 4－63 微波等离子体的两种加工模式

① slm（Standard Liter per Minute）每分钟标准升。

试验结果主要从面形误差和表面质量两方面进行分析。

面形误差：驻留时间的增加会导致温度的明显增加，从而使去除速率增加。因此，在以驻留时间控制加工面形的过程中，去除速率并不是保持不变的如图 4－64 和图 4－65 所示。

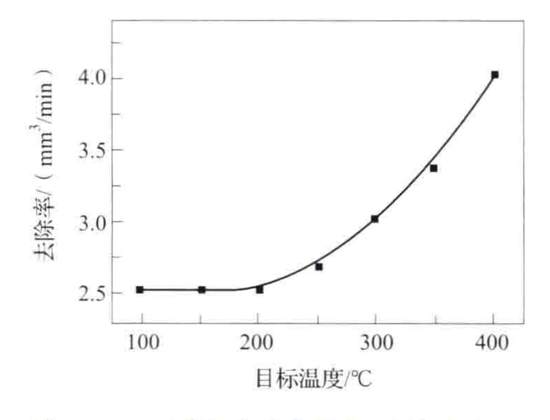


图 4－64　石英的去除率取决于目标的温度（静态过程，低功率）

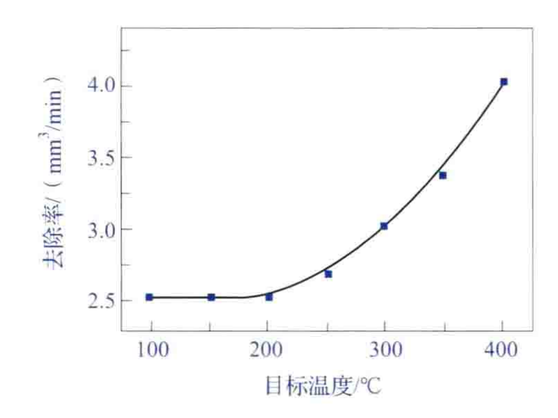
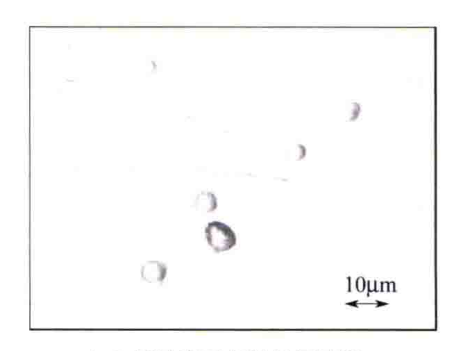
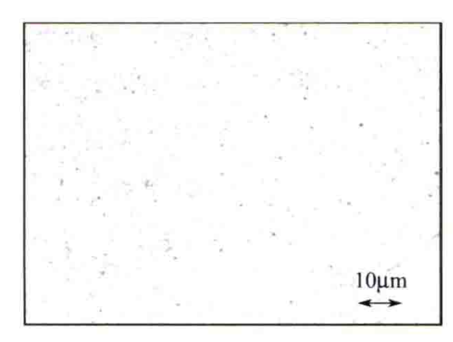


图 4－65　局部驻留时间对局部温度的影响（动态过程，中功率）

表面质量：在等离子体射流化学刻蚀过程中，工件的前序加工工艺形成的表面对加工后的表面质量有很大的影响，所有的表面和亚表面缺陷在化学加工中变得更加明显，如图 4－66 所示。



（a）原始表面未做任何处理



（b）原始表面经酒精清洗

图 4－66　前期工序对表面质量的影响：

（2）表面粗糙度分析

采用等离子体加工去除材料深度 400μm 所用时间为 2.5h，加工表面粗糙度为 200nm（rms），再采用数控抛光方法逐步减小表面粗糙度至 0.2nm 左右，数控抛光去除的深度为 1～2μm，加工条件和结果如表 4－11 和图 4－67 所示。

表 4－11　主要过程参数和腐蚀速率

微波等离子体激发（2.45GHz）	
功率	150W
工作压力	100mbar
Ar 流量	200sccm①

① sccm（Standard Cubic Centimeter per Minute）每分钟标准毫升。

表 4 – 11（续）

SF_6/O_2 流量	200/200sccm
喷嘴与表面距离	20mm
射流半高宽	7.5mm
表面温度	150 ~ 200℃
Si 刻蚀速率	$50mm^3/min$
熔融石英刻蚀速率	$30mm^3/min$

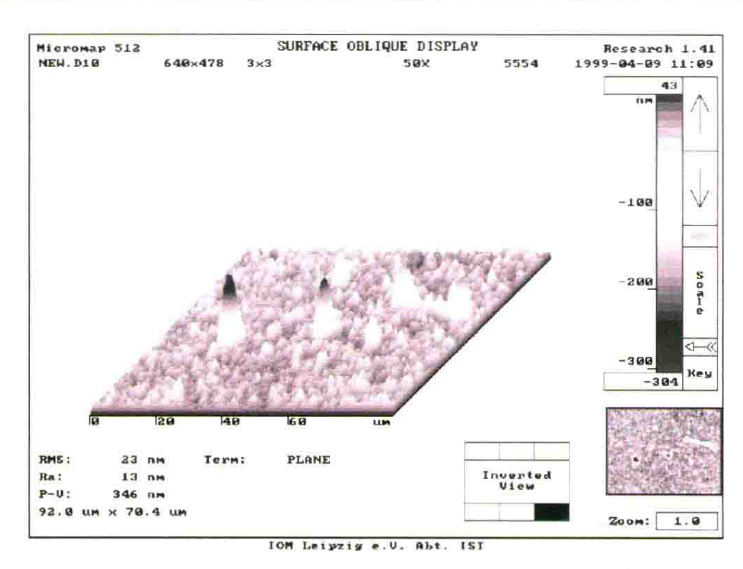


图 4 – 67　加工深度 25μm 的等离子体刻蚀后的石英玻璃的表面粗糙度

微波加工会去除在前期磨削、研磨、抛光中产生的亚表面损伤，但是，由于微波的纯化学刻蚀机理，在加工过程中表面粗糙度会增加，如图 4 – 68 所示。根据不同的加工材料，导致表面粗糙度增加的因素包括以下几点。

①在切割、磨削或研磨加工过程中产生的结构缺陷，氟原子会首先刻蚀这些区域；在磨削和研磨的亚表面损伤较高的表面，粗糙度的增加比较显著，对于精细抛光的低密度亚表面损伤表面，表面粗糙度有较低的增加。

②表面的化学污染物如油脂和其他碳氢化合物会使等离子体优先选择刻蚀或阻止刻蚀，从而导致表面污染物结构转化成为刻蚀的表面结构。

③在加工 SiC 的过程中，必须考虑材料的多晶特点。SiC 晶体结构包含两种不同的晶面——C 面（000 – 1）和 Si 面（0001），不同方向的晶面上刻蚀特点不同。因此，在刻蚀中晶面的选择性在粗糙度的变化过程中有着重要的影响。

因此，在工艺链中需要包括等离子体射流加工（微波）和后续的至少一道抛光工序，从而达到像离子束抛光这样的最终加工方法所要求的表面粗糙度，如图 4 – 69 所示。

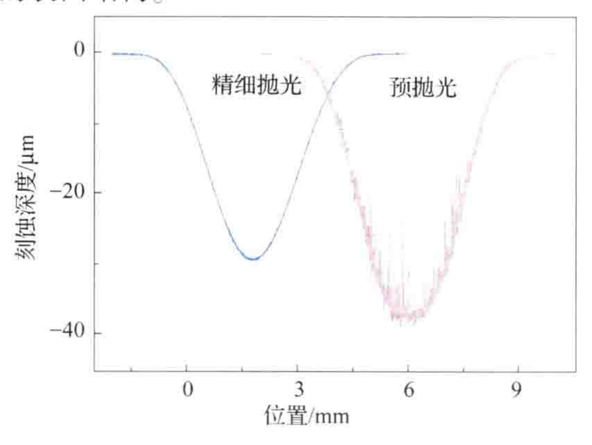


图 4 – 68　表面质量对等离子体加工的影响

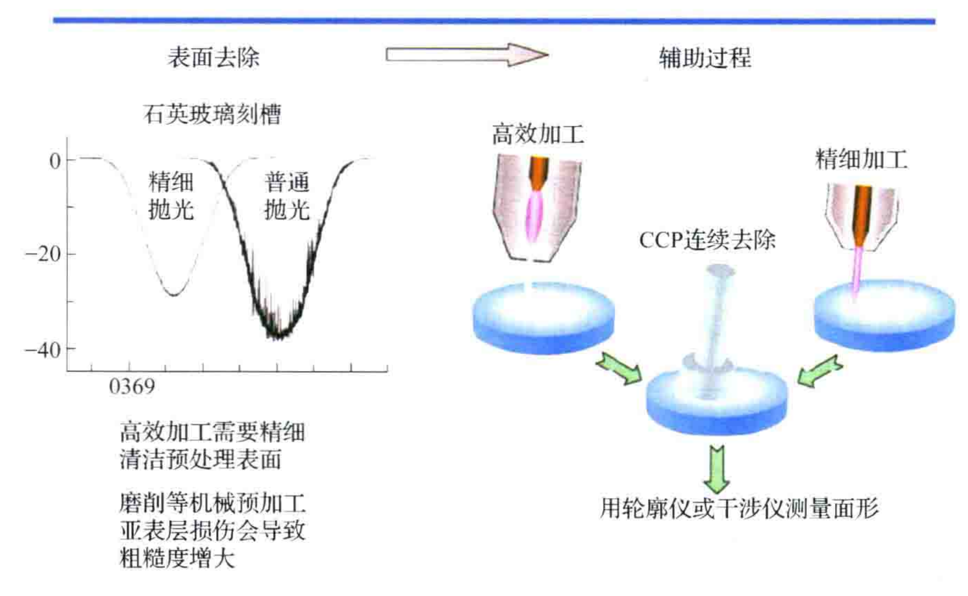


图4-69 微波加工工艺流程

4.3.4.3 微波等离子体射流抛光

等离子体射流抛光是基于等离子体射流加工的等离子炬，利用2.45GHz的微波电源在连续模式下，从中空的阴极激发He/Ar产生等离子体射流，其加工的半高宽为1.5mm。对磨削的熔石英原始表面粗糙度为551nm，经过135W的等离子体抛光后表面粗糙度为0.64nm（白光干涉仪检测）和0.27nm（原子力显微镜检测）。

等离子体射流抛光的原理是通过等离子体射流进入基体表面对石英玻璃基体的加热作用，导致表面局部温度升高到石英玻璃的软化点（1900K），使局部产生热熔合使表面材料再分配但不发生材料的去除，减小表面张力从而达到抛光的效果。

等离子体射流抛光石英玻璃表面如图4-70所示。





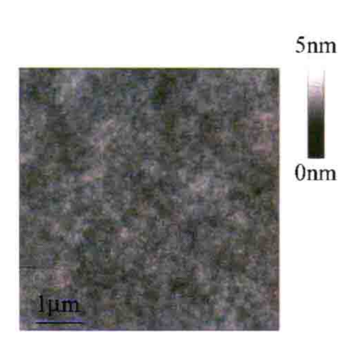


图4-70 等离子体射流抛光石英玻璃表面

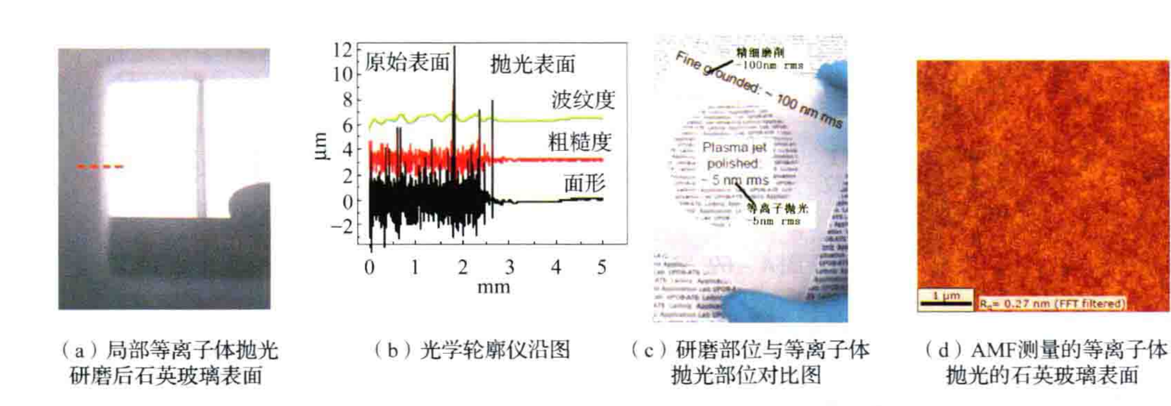
等离子体射流抛光的效果主要由电源功率、气体混合物、射流速度及射流喷嘴与工件表面的距离等参数决定。微波电源功率对等离子体抛光的影响效果是比较显著的。

表4-12所示为研磨过的熔融石英表面，初始粗糙度*Ra*为550nm，加工速率为1mm/s，深度0.1mm，在等离子体抛光后的粗糙度值随微波功率的变化。

表 4-12　粗糙度值随微波功率的变化

微波功率/W	105	120	135
Ra（WLI50x）	76nm	2.35nm	0.64nm

等离子体射流抛光加工精磨石英玻璃表面：在等离子体射流抛光过程中几乎没有任何的材料去除，因此工件的面形基本保持不变。等离子体射流抛光最大的优势在于不仅能够使空间高频粗糙度误差减小到光学级表面质量（<0.5nm(rms)），而且在许多情况下能使中频误差显著降低。并且等离子体射流的小尺寸使它能够应用于小区域或小尺寸大曲率的工件抛光。等离子射流抛光表面质量及形貌见图 4-17。



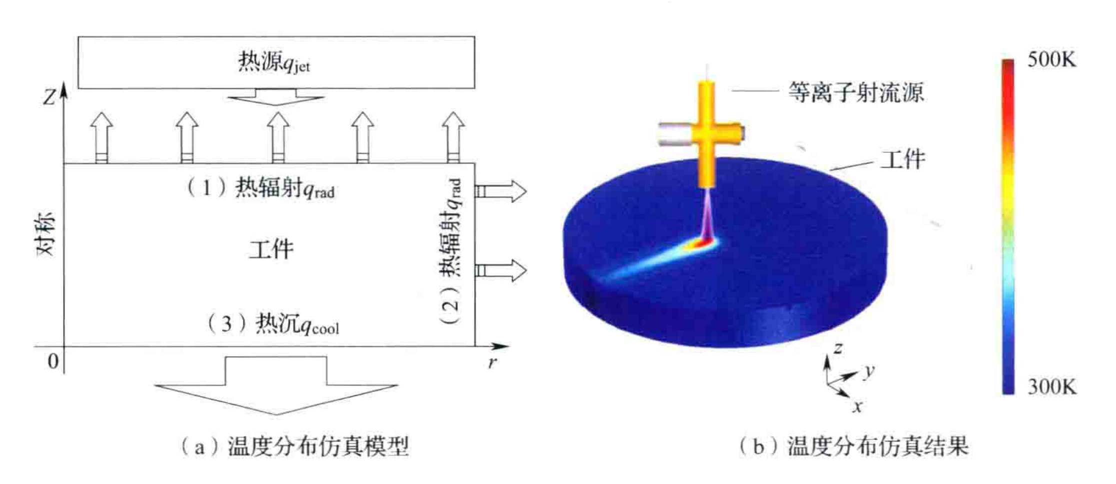
（a）局部等离子体抛光研磨后石英玻璃表面　（b）光学轮廓仪沿图　（c）研磨部位与等离子体抛光部位对比图　（d）AMF测量的等离子体抛光的石英玻璃表面

图 4-71　等离子射流抛光表面质量及形貌

对等离子体射流抛光未来的应用想法是在非球面和自由曲面光学元件的制造过程中，建立包含精密磨削和等离子体射流抛光的低成本工艺链。如果需要更高精度的面形加工，可以把等离子体射流从抛光模式转换到对表面进行局部修形的刻蚀模式。

4.3.4.4　微波等离子体的工艺优化

微波等离子体加工过程中会产生明显的热效应，导致去除率随时间变化而造成加工误差。IOM 对热效应问题进行了深入的仿真和试验分析，如图 4-72 所示。



（a）温度分布仿真模型　（b）温度分布仿真结果

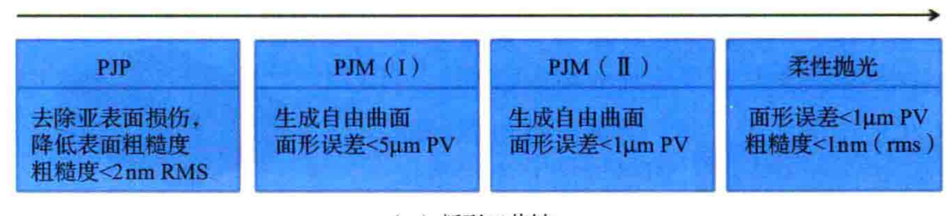
图 4-72　微波等离子体温度仿真

微波等离子体对此类加工误差的补偿方法如下：首先选择合适的工艺参数进行刻蚀试验，确定不同温度分布情况下的加工去除函数；然后对于给定的目标面形，假设去除函数

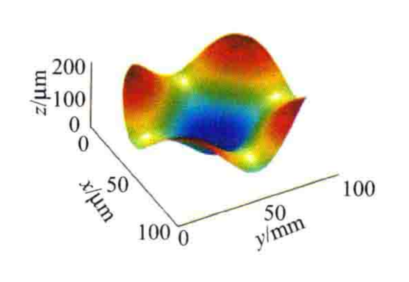
为恒定值，计算驻留时间；根据计算的驻留时间分布以及之前确定的不同温度下的去除函数，预测实际的去除量；调整目标去除量，重新计算驻留时间。由于目标去除量的修正不会引起温度场的大幅度变化，因此这种迭代方法的收敛性较好。

微波等离子体加工后的表面粗糙度在很大程度上受其前道工序（磨削、抛光）以及表面洁净度的影响。对于磨削的表面或者亚表面损伤严重的表面，微波等离子体加工会造成表面粗糙度的恶化。针对这种情况，IOM 在进行微波等离子体加工之前增加一道等离子体射流抛光的工序，即采用与微波等离子体相同的等离子体炬，不添加反应气体、仅用惰性气体放电，利用等离子体射流产生的高温来弥合亚表面损伤，对粗糙的熔石英表面进行抛光，获得超光滑、无亚表面损伤的光学表面。

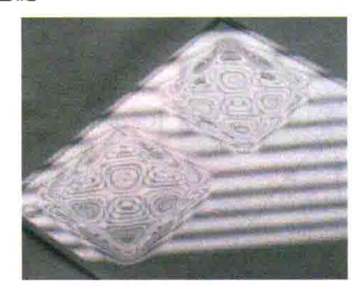
采用如图 4－73（a）所示的新型工艺链在 100mm × 100mm × 3mm 的熔石英片上加工如图 4－73（b）所示的峰谷值为 200μm 的自由曲面。首先采用 PJP 方法将表面粗糙度降低至 2nm 以下；然后依次用 FWHM 为 3mm、去除率为 $2mm^3/min$ 以及 FWHM 为 0.8mm、去除率为 $0.003mm^3/min$ 的微波等离子体去除函数分别将面形误差峰谷值降至 5μm 和 1μm；经过上述两次微波等离子体加工之后，采用非常柔性的抛光工具对该自由曲面进行抛光，使得表面粗糙度小于 1nm，并且将面形误差维持在 200nm 以下，得到如图 4－73（c）所示的符合加工要求的结果。



（a）新型工艺链



（b）目标自由曲面面形



（c）熔石英表面自由曲面加工结果

图 4－73 新型工艺链及加工结果

4.3.4.5 微波等离子体源和射频等离子体源的对比

关于微波等离子体源（2.45GHz）和射频等离子体源（13.56MHz）加工 SiC 的比较如表 4－13 所示，加工示意图见图 4－74。

表 4－13 试验参数

参数	微波激发射流	射频激发射流
CF_4/sccm	0.5 ~ 4.0	1.0 ~ 4.0
O_2/sccm	0.5 ~ 7.0	0.2 ~ 1.0
He/sccm	400	1500

表 4－13（续）

参数	微波激发射流	射频激发射流
N_2/sccm	500	1000
功率/W	5	60
加工距离/mm	3.5	3.5
喷嘴直径/mm	0.3	0.3
温度/℃	25，250，350	25

微波等离子体加工反应气体配比及温度对去除速率的影响如图 4－75 所示。

在 CF_4分解过程中，通过电子的逐步碰撞反应产生 CF_x和自由 F 原子，CF_x在适当的条件下可以在工件表面形成氟碳聚合物，这种效果是更可能在功率保持不变而 CF_4气体流率增加时更为明显，因为微波功率保持不变，导致等离子体中的粒子的能量较低。另一方面，由于电离出来的离子发生的复合反应生成 CF_4，使得等离子体中自由 F 原子的浓度降低，导致刻蚀反应被抑制。

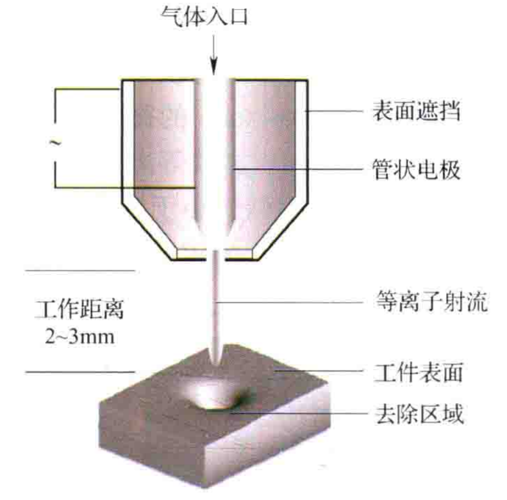
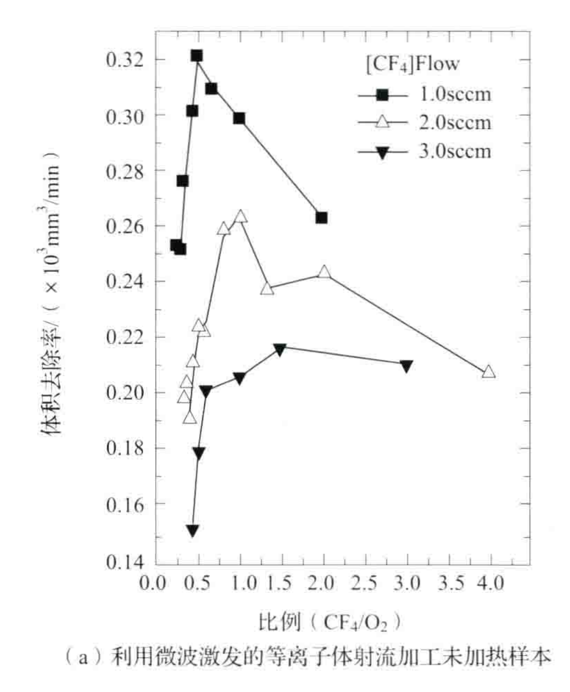


图 4－74　加工示意图

当在 CF_4中添加 O_2，激发出来的 O 原子与 CF_x反应生成 COF_2，使复合反应减少，从而使更多的 F 原子电离生成出来，使刻蚀速率增加。当添加的 O_2/CF_4比例大于 1 时，等离子体电源的能量大部分用于电离激发 O_2，而激发的 F 原子浓度降低，聚合层形成更加明显，导致加工去除速率的降低。



（a）利用微波激发的等离子体射流加工未加热样本　（b）CF_4与O_2的比值为不同常数

图 4－75　微波等离子体加工反应气体配比及温度对去除速率的影响

保持 CF_4 和 O_2 配比在最优的比例，可以使反应生成的挥发性产物 CO、CO_2 和 COF_2 的量增加，因此可以抑制表面聚合物的生成。

微波等离子体加工时：$CF_4/O_2 = 0.5:1$；射频等离子体加工时：$CF_4/O_2 = 5$。

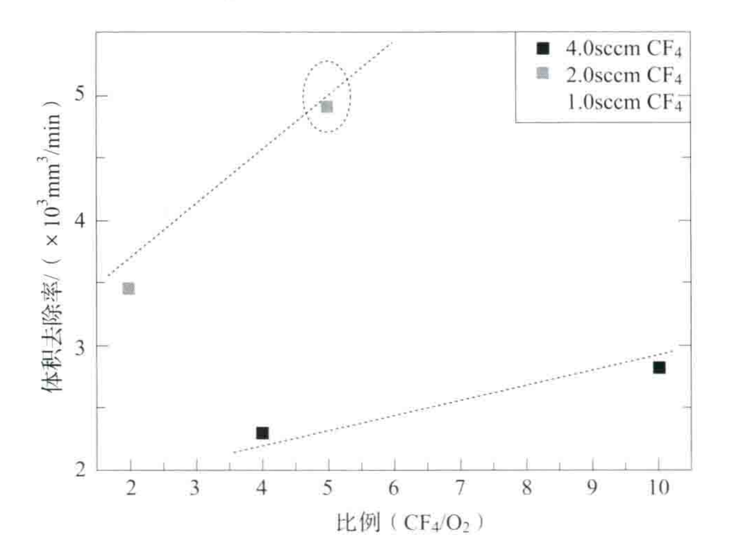


图 4-76　射频电源激发等离子体加工 SiC 去除率与气体配比的变化曲线

与微波等离子加工类似，在射频激发等离子体加工时，CF_4 流量较小，为 1sccm、2sccm 时，加工去除速率比较大，当 CF_4 流量增加到 4sccm，加工去除速率降低。

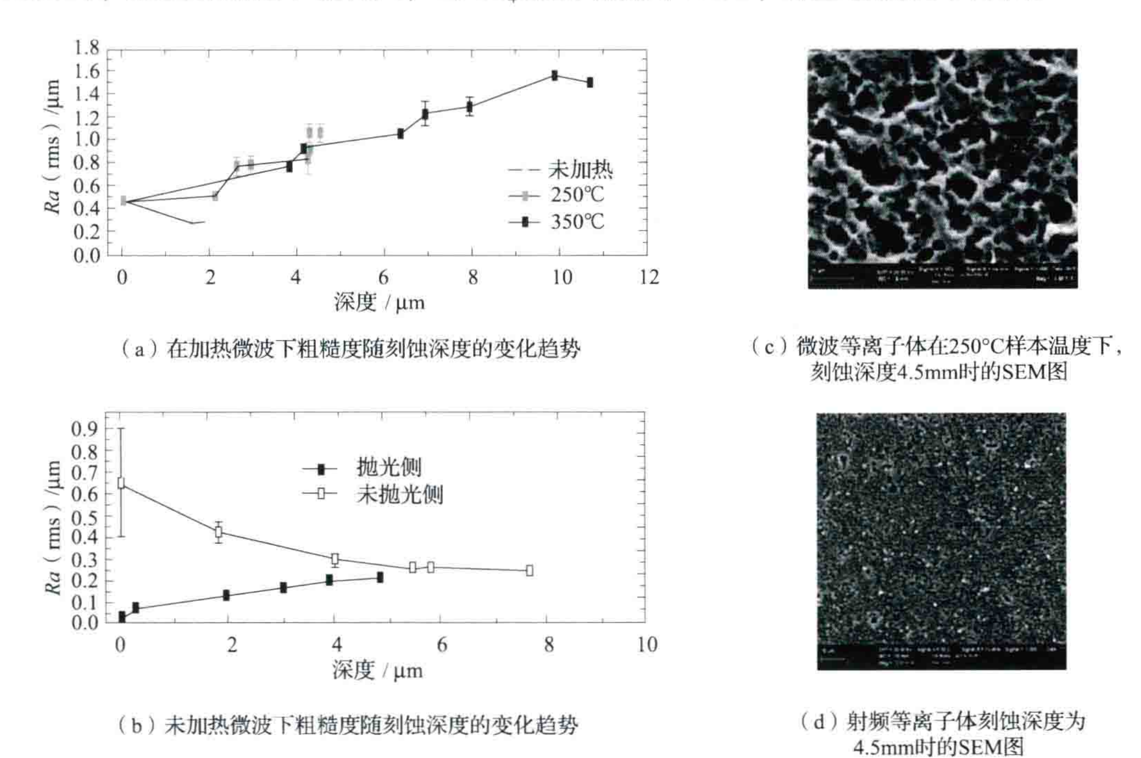


图 4-77　微波等离子体射流加工 SiC 试验结果图

微波等离子体射流加工 SiC，当工件不加热时，表面粗糙度随着加工深度增加而减小；当工件预热时，表面粗糙度随着加工深度增加而线性增加。

加热工件时可能会导致化学加工过程中的选择性刻蚀，由于 Si 面的去除速率比 C 面的去除速率高，因此，在对烧结 SiC 上的晶粒进行蚀刻时取决于它们的表面上的方向。

射频等离子体射流加工 SiC，对于未抛光表面，表面粗糙度显著减少，对于抛光表面，表面粗糙度随着去除深度的增加呈低速率的线性增加。

对比微波等离子体和射频等离子加工相同深度的 SiC 表面 SEM 结果，可以看出材料的去除不仅与化学过程有关，并且与激发电源所提供的高能粒子和电子在表面积累的能量有关。

微波等离子体射流加工 SiC 的最大去除速率在工件加热到 350℃时为：1.5mm^3/h；

射频等离子体射流加工 SiC 的最大去除速率在本文中为 0.3mm^3/h；后来提高至 2mm^3/h。

由于射频等离子体加工的大的去除速率，同时兼顾较高的表面粗糙度，所以射频等离子体更适合加工 SiC。

对 4.3 节内容进行小结，大气等离子体加工具有稳定的去除函数，是一种确定性加工方法。通过等离子体炬的结构设计以及加工参数的设置，可以获得较高的材料去除率和加工分辨率。该方法基于化学反应，加工过程中不会造成表面和亚表面损伤，而且不会引入表面污染物。另外，如果大气等离子体加工的表面粗糙度无法满足光学元件的要求，可以通过后续的小去除量抛光进行改善。因此，采用大气等离子体加工方法作为连续位相板加工工艺链中的一道重要工序是非常有研究价值的。

4.4 快速刀具伺服切削加工技术

4.4.1 快速刀具伺服加工技术原理

快速刀具伺服（Fast Tool Servo，FTS）切削加工技术 20 世纪 70 年代起源于美国，近年来国内许多高校和科研机构以及美国、英国、日本等国家在 FTS 的理论和应用等方面作了大量的研究工作，目前该项技术已经成熟，美国公司已经有 FTS 成熟的产品出售。

快刀伺服装置一般由压电陶瓷驱动，其行程大多在几十到数百微米（μm）之间，带宽在 200～1000Hz。压电陶瓷刚度高、运动质量轻，因而具有高的带宽，但压电陶瓷的主要缺陷是它的行程较短。采用机械放大的办法可以扩大运动的范围，但是这会显著降低系统频响并带来刀具运动的误差。快刀伺服技术最初是与精密在位测量配合，用来实时校正金刚石车床伺服轴的运动误差以改善加工精度。

基于 FTS 的金刚石超精密车削加工现场如图 4－78 所示，工件安装在主轴上旋转，金刚石车刀装在伺服刀架上，由快速伺服刀架带动刀具，使刀尖的 Z 向位移与主轴的旋转及 X 向溜板的位移保持同步，即刀具沿着 Z 轴方向能够严格按照端面的极坐标（r，θ）完成符合微结构功能表面方程的往复运动，从而加工出微结构功能表面。由于工件主轴旋转角速度一般都较快，因此刀架伺服机构应当具有良好的频率特性，能随着主轴的旋转及溜板的移动完成高频微位移运动。

FTS 控制系统为独立于超精密切削机床数控系统之外的一套附加装置，它根据刀具相对于工件的径向位置和角度位置计算刀具微进给量，控制金刚石刀具伸缩从而实现非回转对称光学表面的超精密加工，控制原理如图 4－79 所示。



图 4－78　FTS 加工系统

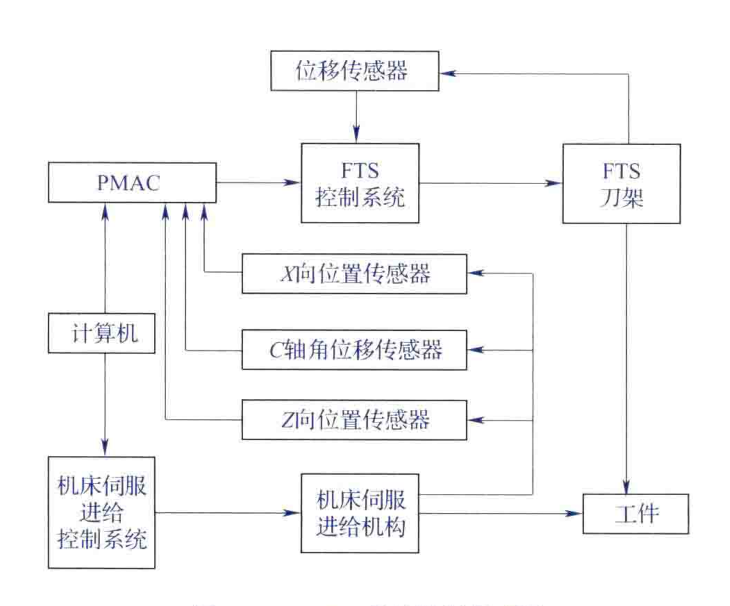


图 4－79　FTS 系统控制原理图

使用可编程序多轴控制器（PMAC）控制压电陶瓷电机，直接驱动刀架运动，实现金刚石刀具的进给，主轴安装在 X 向导轨上，刀架安装在 Z 向导轨上。工件安装在主轴上，进行高速回转运动。金刚石刀具安装在刀架上，由 FTS 控制系统控制产生 Z 方向高频率的微位移。被加工工件的微结构尺寸是刀架 X 向位移、Z 向位移和 C 轴转角的函数。工件在加工过程中，X 轴上的位置传感器、Z 轴上的位置传感器和主轴上的角度传感器分别将主轴的 X 向位置信号、刀架的 Z 向位移信号和主轴旋转角度信号发送到 PMAC。PMAC 接受位置信号，并按照控制规则计算后，输出位移信号到 FTS 控制系统。FTS 控制系统接收位移信号，输出电压信号控制压电陶瓷伸长、缩短，从而实现金刚石刀具对工件微结构的加工。采用这种半闭环的控制方式，可以保证在加工中的精度要求，并且可以提高整个系统的响应频率。

4.4.2 伺服刀架设计

伺服刀架是驱动刀具进行高分辨率、高频响的进给运动的关键，工作方式一般为通过一些特殊的驱动装置（如磁致伸缩式驱动、声圈电机缩式驱动、电致伸缩式驱动和压电式驱动等）驱动柔性铰链机构进行高精度的进给运动。

FTS 系统要得到稳定的纳米级分辨率的定位和高的运动精度，要求机械传动结构具有摩擦小、传动环节简单等性能，柔性铰链的优点充分满足了 FTS 系统达到亚微米级的定位精度，运动的机械传动机构具有高的运动分辨率和定位精度的要求。柔性铰链有很多种结构，最常用的是直柔性铰链结构。其杆部结构横截面为矩形，中间具有对称的半圆结构切口，在受力矩作用时会产生明显的弹性变形，在机械机构中起铰链的作用。柔性铰链机构具有机构紧凑，传动关系明确，无传动空程并且无摩擦等优点，适合与压电元件构成微小型、高精度的工作台。

伺服刀架在装配时，通过预紧螺钉施加合适的预紧力，可以消除各零件安装的间隙，特别是钢球与铰链接触以及钢球和压电陶瓷电机接触的间隙。柔性铰链处于弹性形变状态，增大了回程时的回复力；并且增大钢球和铰链的接触变形量，同时增大了钢球和铰链的接触刚度。压电陶瓷轴向伸长时，刀具轴向微位移由柔性铰链机构的弹性变形实现，对称式的复合四边形铰链机构与钢球组成的传动机构，可以使压电陶瓷电机的推力沿轴向方向，理论上消除径向附加位移，减小运动误差，并且可以避免压电陶瓷受剪切力遭到破坏，如图 4-80 所示。

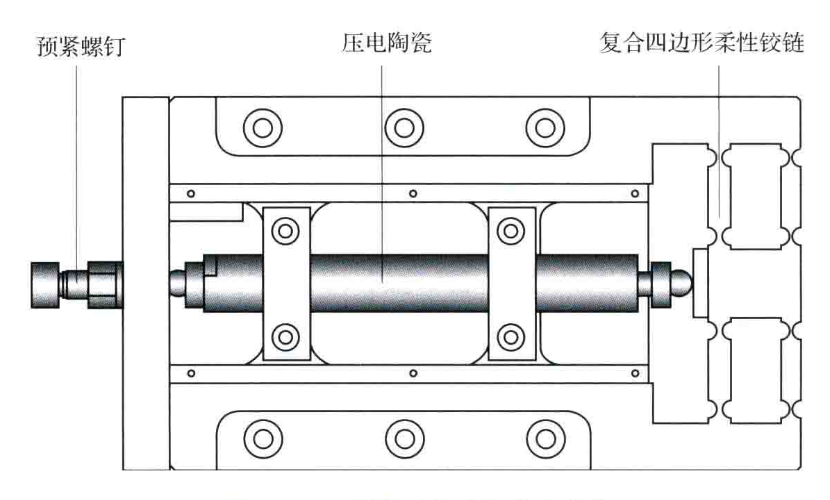


图 4-80 伺服刀架的各组成部分

伺服刀架经常见的结构如图 4-81 所示，使用压电陶瓷、声圈电机等直接驱动铰链变形实现高频率的进给运动，运动部分为复合四边形柔性铰链机构，伺服刀架的这种结构使预紧机构的预紧力、压电陶瓷的推力和柔性铰链的运动方向处于同一条直线上，理论上消除径向的附加位移，并且可以避免陶瓷受到切削产生的剪切力破坏，并且可以体现柔性铰链传动的优点，使伺服刀架的进给能够达到很高的精度。

FTS 系统能够实现一些数百微米量级的小矢量光学自由曲面的加工。但是由于压电陶瓷的行程一般在几微米至 200μm 之间，限制了 FTS 进给范围，用这种技术加工自由曲面光学表面是有一定局限性的。如果采用杠杆原理对压电陶瓷的输出进行放大，图 4-81（b）

为一种放大式的 FTS 系统结构图，可以显著增大 FTS 系统的行程，但同时也存在固有的不足：

①由于其内部约束反力和外部负载等因素的影响，其实际的放大倍数小于理论的放大倍数；

②进给的方向与压电陶瓷的推动力不共线并且存在一个微小的夹角，由于柔性铰链的变形，刀架的位移与压电陶瓷的变形量不是严格的线性关系，增大了系统的误差，并且控制方法复杂；

③伺服刀架进给的分辨率和响应频率降低。

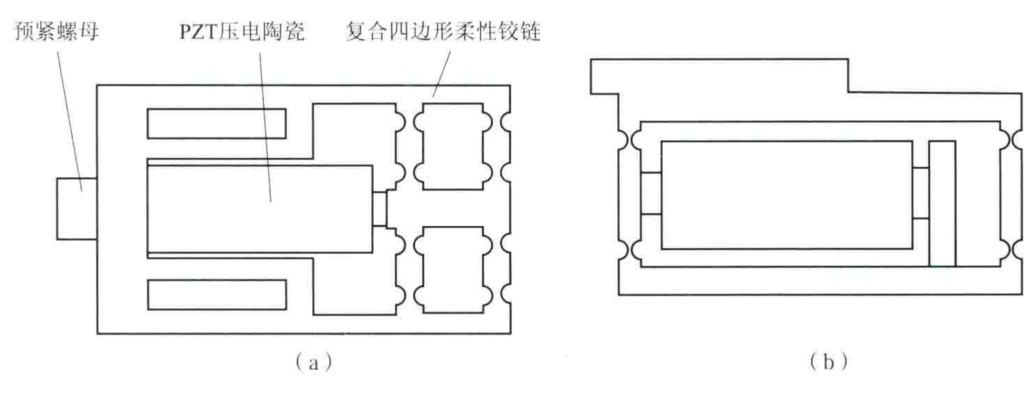


图 4－81　伺服刀架的典型结构

4.4.3　快刀伺服系统特性测试

在完成了超精密快刀伺服装置的研制后，还需对其静动态性能进行测试，以验证是否能够满足超精密快速车削的加工要求，测试框图如图 4－82 所示。性能测试参数主要包括刚度、电压－位移关系、线性度、定位精度和重复定位精度、运动频响等。

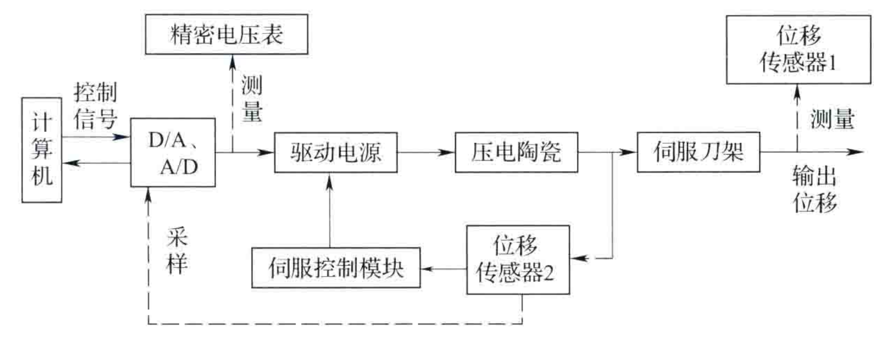


图 4－82　快刀伺服装置的性能测试框图

①刚度测试：弹性铰链在加工时尺寸不可避免地存在误差，其实际上刚度无法与理论计算得到的刚度完全符合。通过在给铰链施加拉力负载，然后测量其变形量，拉力与变形量的比值即为铰链机构的刚度。

②电压－位移关系及线性度测试：给快刀伺服系统施加控制电压，测量其位移输出，控制电压与刀具位移应具有很好的线性关系，经过数据处理得到电压－位移的关系。

③定位精度和重复定位精度测试：定位精度是快速伺服刀架在接受控制指令时实际到

达位置与理想位置的最大偏差值，重复定位精度是伺服刀架经过多次恒定控制位置时的最大偏差。给压电陶瓷驱动系统多次发送指定位置以及不同位置的控制信号，并多次测量压电陶瓷位移系统的位移输出值。对结果进行分析，可以得到快刀伺服系统的定位精度及重复定位精度。

④工作频响测试：FTS 系统的工作频响等动态性能是指其对输入信号的响应时间的长短。FTS 动态性能由压电陶瓷的动态性能和系统的运动部分的结构决定，FTS 系统具有高的响应频率是保证能够加工复杂的微结构表面的关键，FTS 系统响应频率是系统能否达理想效果的主要制约因素。

图 4 - 83 为一快速刀具伺服系统在不同响应频率下所能达到的振幅值的测试结果，从图中可以看到随着驱动信号频率的增大，FTS 系统能够达到的行程减小。同时由于伺服刀架系统中各部件之间的接触刚度等原因致使输出位移的实际值一般要小于理论计算值。快速伺服刀具的动态特性直接决定了微结构特征的加工质量。

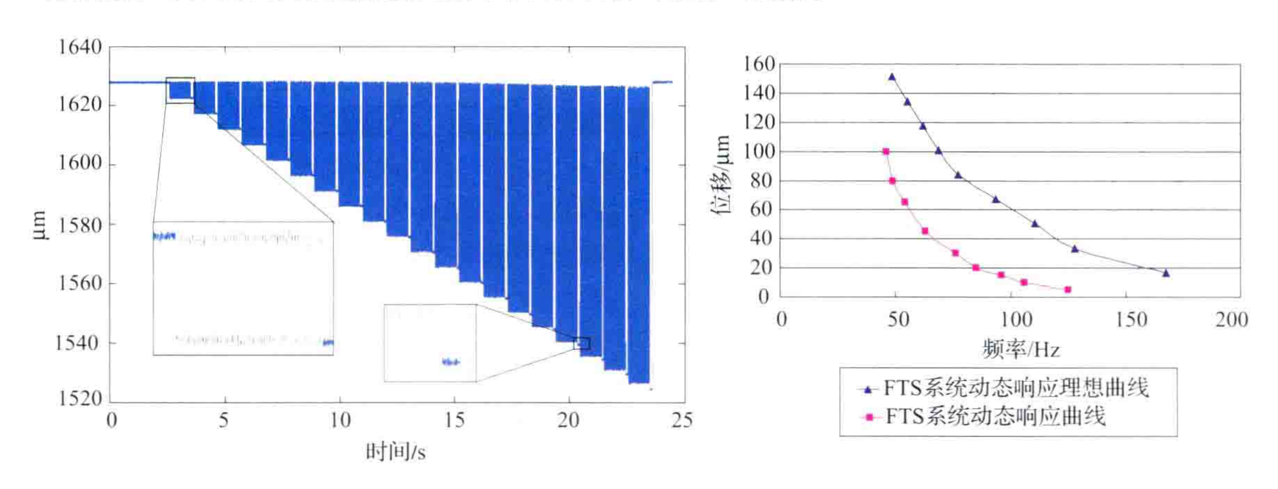


图 4 - 83　快速伺服刀具动态特性测试结果

4.4.4　微结构阵列超精密车削加工技术快刀伺服系统加工实例

4.4.4.1　加工对象

光学薄膜广泛应用在手机、掌上电脑及笔记本电脑等显示领域，其表面经常具有海量的精密微结构。辊子模压是将辊子表面的微结构直接复印到光学薄膜上，是光学薄膜大批量高效生产的唯一手段，具有优良形状精度和表面粗糙度的辊子是得到高质量光学薄膜的前提。超精密车削成形是辊子圆柱面微结构的一种高效加工方式。本节以圆柱球面微结构阵列为例，从其数学描述入手，分析刀具几何尺寸、伺服系统动态特性与微结构加工可达性之间的制约关系。

图 4 - 84 是在直角坐标系中的单个球面二维图形，对于具体的球面（球心坐标 $(h-r, 0, 0)$；h 为球面深度，r 为球面半径）而言，空间球面上的点与球心的关系见式（4 - 64）

$$[x-(h-r)]^2+(y-0)^2+(z-0)^2=r^2 \tag{4-64}$$

通过对 Z 与 Y 方向进行周期延拓，如图 4 - 85 所示，可得到平面球面微透镜阵列表达式为

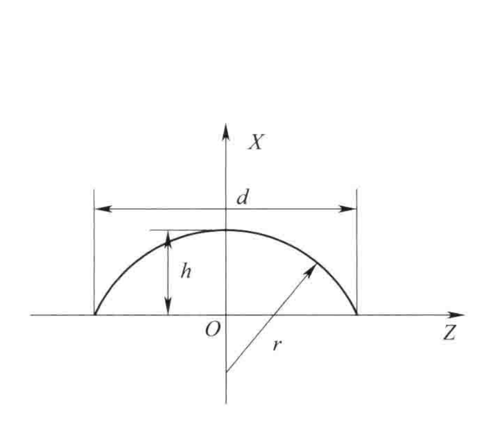


图4-84　单个球面二维图形

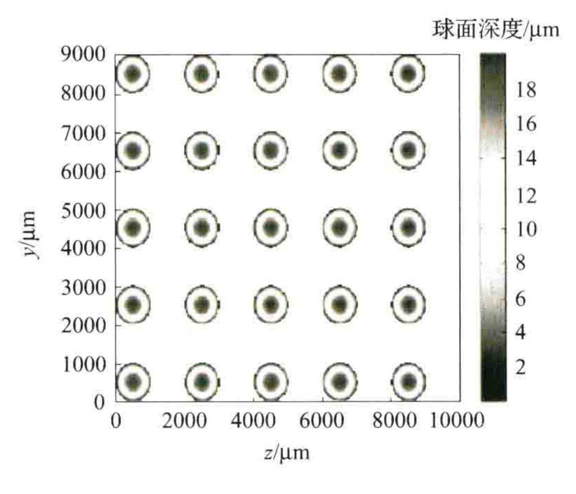


图4-85　正方形分布球面微结构阵列

$$[x-(h-r)]^2+(y-s_i)^2+(z-l_j)2=r^2 \quad (4-65)$$

其中i，$j=0$，1，2，…，而（$h-r$，s_i，l_j）为平面球面微透镜阵列上Y方向第i列Z方向第j行球面的球心坐标，显然各个球心之间是相离的拓扑关系。微透镜口径一般几十微米至几毫米不等，本例取1mm口径来设计试验。正方形网格分布的球面微结构阵列如图4-85所示，轴向和圆周方向周期均为$\lambda=2$mm，口径$d=1$mm，球面透镜深度均为$h=20\mu$m。

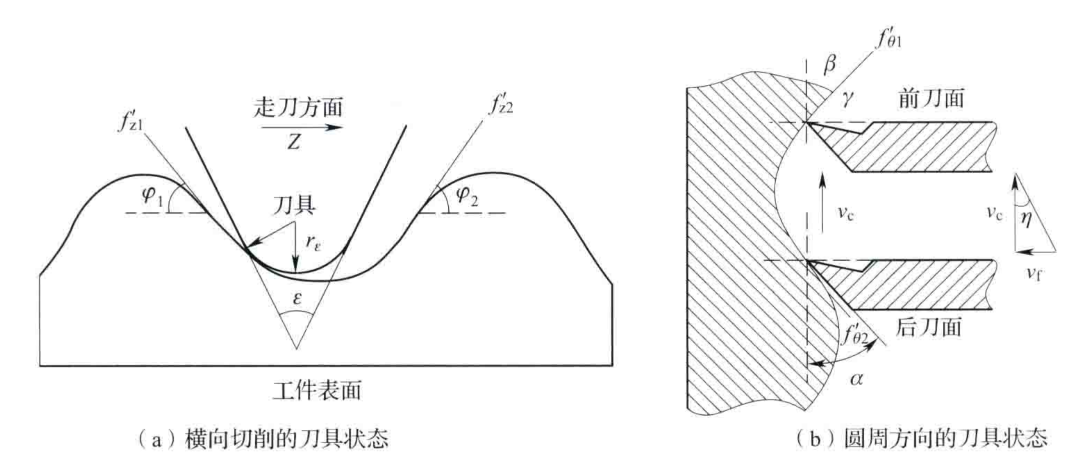
圆柱面微结构的加工与平面不同，为了让平面微结构复印在圆柱面上，令$y=R_\theta$，θ为主轴的转角，R为圆柱工件的半径，则式（4-65）可转化为参数（θ，z）的方程

$$X(z,\theta)=\sqrt{r^2-(R\theta-s_i)^2-(z-l_j)^2}-r+h \quad (4-66)$$

由于X方向进给量与$x(x\geqslant0)$相等，已知θ、z这两个参数，就得到刀具的进给深度，因此式（4-66）即为球面阵列加工的切削方程。

4.4.4.2　刀具几何尺寸与微结构可加工性的制约关系

金刚石刀具刀尖圆弧半径、前角和后角对微结构的可加工性具有制约关系，如图4-86所示为刀具某一时刻沿轴向和圆周方向的切削状态。随着加工过程的进行，不同时刻刀具加工的轮廓曲线并不相同，刀具在沿Z轴正方向运动的过程中，为了避免刀具与工件发生



（a）横向切削的刀具状态　　（b）圆周方向的刀具状态

图4-86　不同方向切削刀具的状态

干涉引起过切，刀尖圆弧半径 r_ε 必须比截面轮廓曲线上任意一点的曲率半径都小，即 $r_\varepsilon \leqslant \rho_{\min}$。如图 4－86（a）所示。

在沿圆周方向的快速精密进刀过程中，在工件面形上升段可能发生干涉的区域位于前刀面，在下降段可能发生干涉的区域位于后刀面。球面微结构具有特殊性，如图 4－87 沿圆周方向刀具与轮廓的关系所示，分析刀具下降段，当对半径为 r_1 的轮廓进行加工时，在端点 A，圆弧切线与切削速度 v_c 夹角 δ_1 最大，与刀具发生干涉的可能性最大，同理半径为 r_2 的轮廓端点 B 的切线与 v_c 夹角 δ_2，显然，$\delta_1 > \delta_2$，因此刀具后角 α 必须满足 $\alpha \geqslant \delta_{\max}$，$\delta_{\max}$ 对应球面最大轮廓的端点切线与 v_c 的夹角。在上升段，轮廓曲线上任意一点的切线与切削速度 v_c 的夹角 β 均小于 90°，通常加工铜铝等塑性材料时，前角 γ 一般为正或零度，所以不会发生干涉。

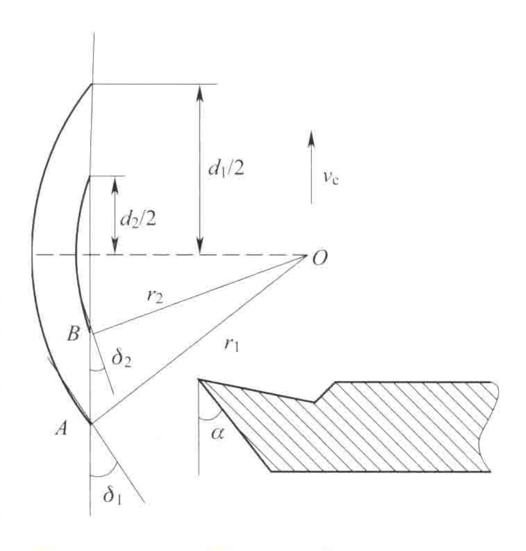


图 4－87　沿圆周方向刀具与轮廓的关系

根据上述分析，选取天然单晶金刚石刀具参数如下：刀尖圆弧半径 r_ε 为 0.2mm，前角 γ 为 0°，后角 α 为 12°。

4.4.4.3　伺服刀具动态性能与微结构可加工性的制约关系

快刀伺服系统动态性能的好坏是影响微结构加工质量的关键因素之一，理想状态下，快刀伺服系统的运动位移应具有零迟滞和线性输出等动态性能，但实际应用中由于压电陶瓷驱动元件固有特性和伺服刀架机械结构固有频率等的影响，不可避免地存在响应延迟和位移衰减，受到系统带宽的限制，这种情况在高频工作条件下尤其明显，甚至可能有零输出现象。

对于沿圆周方向具有周期性的微结构阵列，我们可以给出伺服刀具与微结构可加工性之间的一般性制约关系式，即

$$\pi Dn/(60\lambda) \leqslant B \tag{4-67}$$

式中：D——辊子直径；

n——主轴转速；

λ——微结构圆周方向周期；

B——快刀伺服系统的带宽，也就是在一定位移条件下系统所能达到的频率。

式（4－67）具有一定的普适性，对于正弦微结构的加工，可作为试验参数（n，λ，D）能否满足伺服刀具动态性能要求的判断条件，但对于球面微结构和其他类型甚至复杂的微结构而言，对快刀伺服系统的输入信号做功率谱分析是更为准确的判断方法。输入信号的波形频谱能够反映信号的时变特征和动态特性（频率特性），周期信号的功率谱是离散的谱线，通过观测功率谱了解输入信号的频率结构，其主要频率分量在不超过快刀伺服系统带宽的情况下，伺服刀具的动态特性可满足微结构可加工性的要求。

4.4.4.4 刀具路径规划

在球面微结构阵列的快速车削加工中，球面边缘的面形结构产生突变，对应的控制信号在突变位置会产生一定的振荡，影响到工件面形边缘的的加工精度。解决方法是在球面的外沿进行一定量的延拓（如图4-88虚线部分所示），延拓线的高度等于h_0，使突变发生在非加工区域内，球面外的部分不进行加工，减少加工面积，降低磨损。微结构的偏置距离不能太大，否则刀具的整体位移会超过快刀伺服系统的要求。球面微结构的深度是20μm，偏置距离选择5μm。试验所用的超精密车床X轴和Z轴的定位精度为0.1μm，首先在工件装夹找正后进行X方向对刀，确定主轴中心（即工件中心）与刀尖的相对位置，再次装夹工件对其表面进行一次精加工，确定了工件最终直径，最后移动刀架使刀尖与工件加工面距离5μm，即完成了偏移定位。

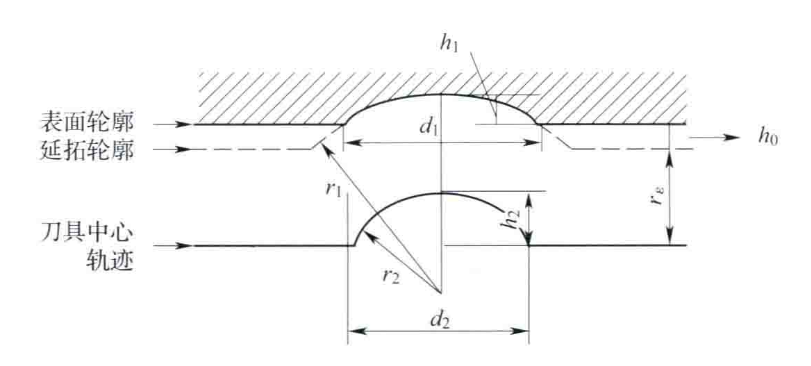


图4-88 工件旋转至某一角度位置的XOZ截面

在微结构阵列加工过程中，如果不进行刀具半径补偿，则沿轴向加工的轮廓产生过切，影响加工精度。对理想加工曲面做等距面，距离为刀尖圆弧半径r_ε，显然任意截面刀具中心的轨迹是圆弧，圆弧半径$r_2 = r_1 - r_\varepsilon$，$r_1$为任意截面的圆弧半径。实际加工中，刀具中心轨迹是等距螺旋线上圆弧轨迹的叠加，利用Matlab软件对刀具中心轨迹进行仿真，对加工结果进行预测。

利用Form Talysurf PGI 1240轮廓仪对球面微结构阵列中其中一个球面进行平行于轴线的轮廓的检测，结果如图4-89所示，球面的深度20.14μm，口径0.9959mm。

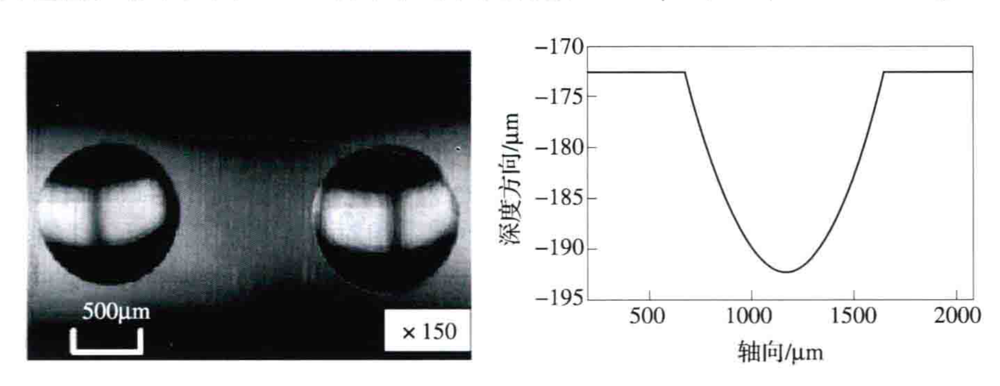


图4-89 加工得到的微球面以及检测结果

4.5 慢拖板伺服车削加工技术

4.5.1 概述

慢拖板伺服（Slow Slide Servo，S^3）车削技术也称超精密慢刀伺服（Slow Tool Servo，STS）车削技术，是近些年才出现的一种超精密加工技术，该技术建立在超精密单点金刚石车削的基础之上。美国的摩尔公司和 Precitech 公司率先研究慢拖板伺服加工技术，并实现了慢拖板伺服加工机床的量产。摩尔公司的 Nanotech 和 Precitech 公司的 Nanoform 机床系列代表了当前最先进的慢拖板伺服超精密加工机床。

慢拖板伺服车削技术主要是对超精密车床工件主轴与 Z 轴进行联动控制，使工件主轴变成位置可控的 C 轴，在机床 X、Z、C 三轴的空间柱坐标系中，将复杂面形零件的三维轮廓坐标（x，y，z）转化为极坐标（R，θ，z），典型的车床布局如图 4－90 所示。

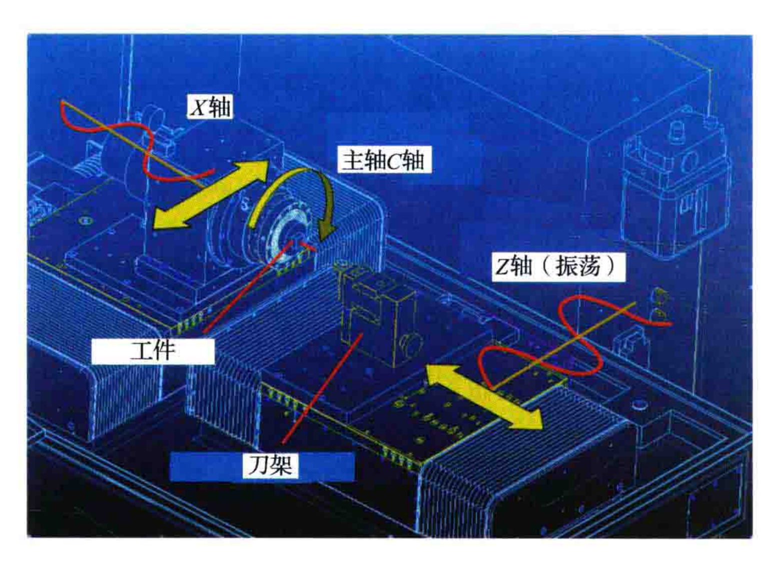


图 4－90　慢拖板伺服加工原理图

同时，高性能和高编程分辨率的数控系统将复杂面形零件的三维笛卡儿坐标转化为极坐标，并对所有运动轴发送插补进给指令，精确协调主轴和刀具的相对运动，实现对复杂面形零件的车削加工。超精密慢拖板伺服车削技术的两根轴线 X 轴和 Z 轴呈“T”字形布局。工件安装固定在 X 轴的工件主轴 C 轴上，X 轴的移动方向与工件主轴 C 轴的旋转轴方向垂直。金刚石刀具安装在 Z 轴，运动方向垂直于 X 轴并与工件主轴 C 轴旋转轴线平行。金刚石刀具按照工件不同的角度 θ 和径向位置 x 相对于工件表面运动，Z 轴进给量由数控系统根据 X 轴位置 R 和 C 轴角度位置 θ 决定，即有 $z=z(R,\ \theta)$。因此，在加工前需要对零件面形进行多轴协调分析，进而确定刀具路径。此外，超精密慢拖板伺服车削技术受机床拖板惯性和直线电机响应速度影响较大，一般适合加工面形连续而且较大的复杂光学器件。

慢拖板伺服车削加工与快刀伺服车削加工技术虽然有很多相似之处，但本质上是不同的。快刀伺服车削加工中由专门的刀架提供往复运动，虽然频响提高，但行程受到很大限制，而且增加了加工系统的复杂性；而慢拖板伺服加工直接控制 Z 轴做往复运动，行程

大大增加，但频响无法达到很高。快刀伺服车削加工中刀架的控制与机床 X、C 轴的控制是分离的，通过读取 X、C 轴的位置计算得到 Z 轴的位置单独控制伺服刀架进行往复运动，存在时滞现象；而慢拖板伺服加工 X、Z、C 三轴联动进行加工，因此，慢拖板伺服加工没有时滞，可以得到更高精度的面形。

4.5.2　慢拖板伺服车削机床加工能力分析

对于一台慢拖板伺服车削机床，动态性能决定了加工能力。在慢拖板伺服车削刀具路径生成中，一般保证机床旋转轴 C 轴和直线轴 X 轴匀速运动，直线轴 Z 轴提供往复运动。因此，Z 轴的动态特性直接决定了设备的性能。

慢拖板伺服车削加工是通过三轴联动按照生成的三维刀具轨迹加工出所需面形，因此曲面是否能加工等同于机床能否实现预定的刀具轨迹。对于不同的自由曲面工件，生成的刀具轨迹曲线互不相同。由于慢拖板伺服车削加工中刀具相对工件表面按照螺旋线轨迹运动，因此可以用参数方程来描述。假设任意一个自由曲面工件刀具轨迹的参数方程为

$$\begin{aligned} c &= C(t) \\ x &= X(t) \\ z &= Z(t) \end{aligned} \tag{4-68}$$

由于慢拖板伺服车削加工中 C 轴及 X 轴匀速运动，对于 Z 向刀具轨迹进行分析，根据傅里叶变换理论，对于任意的二维曲线，总能表示成若干个正弦曲线的线性相加

$$z = Z(t) = \sum_{i=1}^{n} A_i \sin(\omega_i t) \tag{4-69}$$

因此可以用正弦曲线代替任意的 Z 向刀具轨迹进行分析。根据加工机床允许的最大行程、最大速度以及最大加速度限制计算可加工的范围，得到机床对应于正弦曲线轨迹的加工能力。

假设正弦轨迹曲线方程以及对此轨迹曲线方程分别求一次导数和二次导数，分别得到的速度和加速度曲线方程为

$$\begin{aligned} z &= A\sin(2\pi ft) \\ v &= z' = 2\pi fA\cos(2\pi ft) \\ a &= z'' = -4\pi^2 f^2 A\sin(2\pi ft) \end{aligned} \tag{4-70}$$

对于幅值 A、频率 f 的任意正弦轨迹曲线，从式（4－70）可以计算出对慢拖板伺服切削机床最大行程、最大速度以及最大加速度等指标的要求，当计算值均小于设备指标时，表示可以用此机床进行加工；否则，无法加工。对于任意曲线，将其分解为若干个正弦曲线的叠加后，则需要对根据所有正弦曲线的幅值和频率重复前面的计算并判断能否加工。

对于非光滑的曲线，用傅里叶变换法得到的正弦叠加已经无法正确反映实际曲线的形貌，在加工阵列时，进出阵列时刀具轨迹是突变的，导致机床必须有一个瞬时的速度变化才可以完全跟踪所加工曲线，而速度是无法瞬时变化的，这必将导致跟踪轨迹的误差甚至机床的无法响应。对于此类非光滑曲线，不能用可加工性曲线进行判断，但可以由轨迹曲线直接计算出所需的速度和加速度，再与允许的速度、加速度限制进行对比，判断是否能够实现加工。

综上所述，可以得到慢拖板伺服加工自由曲面可加工性的一般方法，如图 4 – 91 所示。对于光滑的刀具轨迹，将其用傅里叶变换的方法等效成正弦曲线的叠加，然后判断所有正弦曲线的幅值—频率坐标对应于可加工性曲线的位置，如果在可加工区域，则表示可以实现加工，如果在可加工区域外，则表示无法实现加工。对于非光滑的刀具轨迹，将刀具轨迹曲线做微分处理，得出速度加速度曲线，然后判断其是否在最大速度、最大加速度允许的范围内，在允许的范围内则表示可以加工，不在允许的范围内则表示无法加工。理论上只要转速足够小，任何自由曲面工件都可以实现加工，但是实际加工中主轴转速必须大于一个下限值，以保证材料的连续切削。

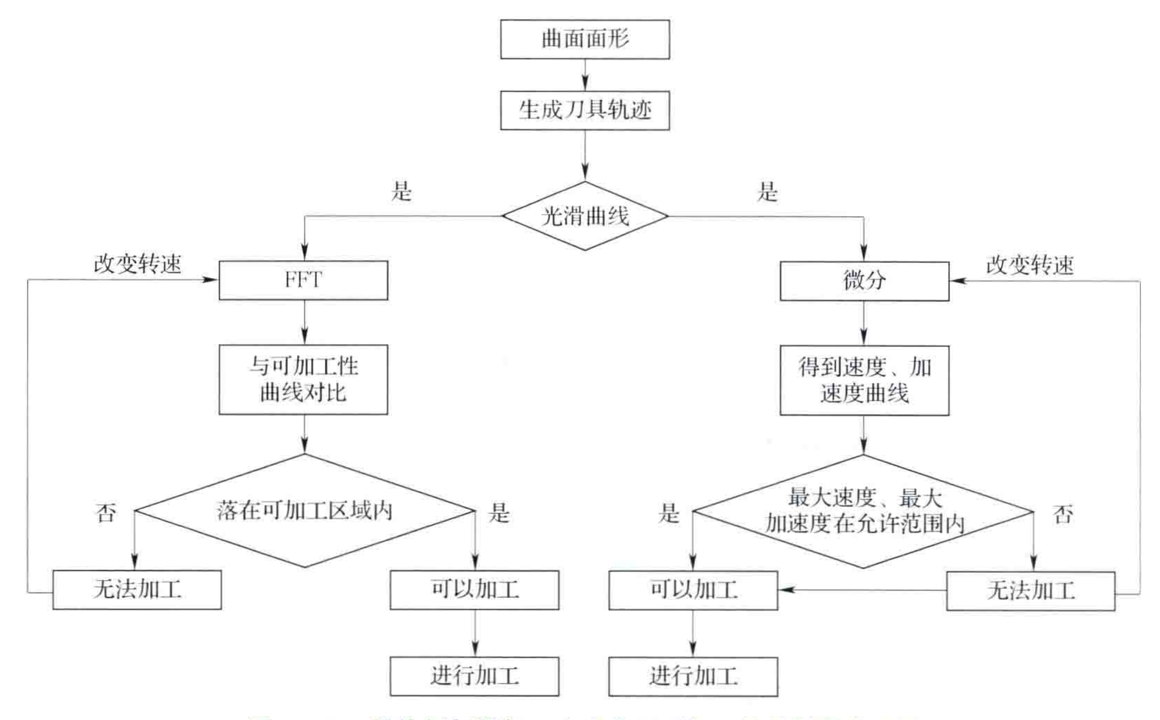


图 4 – 91　慢拖板伺服加工自由曲面可加工性的判断流程图

4.5.3　刀具几何参数选择

在自由曲面加工中，刀具与工件之间的干涉现象会导致加工后面形失真，甚至损坏刀具和工件，因此必须保证所选刀具与工件之间不发生干涉现象。自由曲面的表面形貌十分复杂，加工时刀具与周边曲面形貌的几何关系随时间不断变化，无法用直接观察的方法判断是否存在干涉，必须经过严格的计算，从而确定所选刀具的几何参数。需要确定的刀具几何参数主要有：刀尖圆弧半径、有效切削角度、前角和后角等。

4.5.3.1　刀尖圆弧半径的选择

如图 4 – 92 所示，设自由曲面工件表面任意一径向截面曲线方程为 $z = f(x)$，为了保证不产生过切现象，刀尖圆弧半径 R_t 必须小于交线上任意一段曲线的拟合圆半径 R_f，然后历经所有的径向截面，得到一个最小的拟合圆半径 R_{fmin}，只要满足

$$R_t \leqslant R_{fmin} \tag{4-71}$$

就能保证不过切，求解最小拟合圆半径等同于求解曲线的最小曲率半径，从而刀尖圆弧半径的选择归结于交线 $f(x)$ 上最小曲率半径的求解。

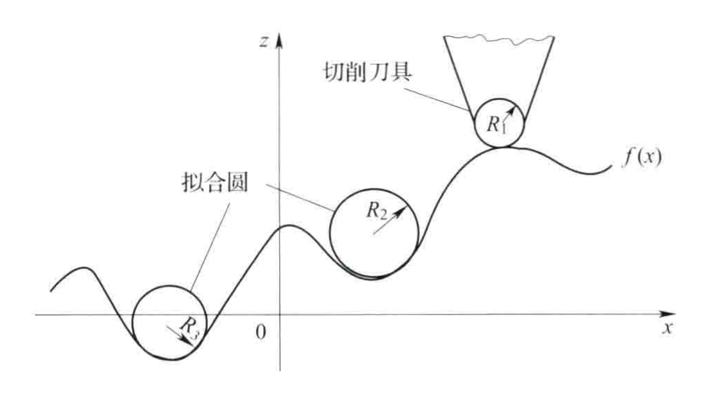


图4-92 刀尖圆弧半径计算示意图

4.5.3.2 有效切削角度的选择

假设自由曲面工件表面任一径向截面曲线方程为 $z=f(x)$，如图4-93所示，任意一个刀触点位置的法矢量 $\boldsymbol{n}_i$ 与 X 轴的交角为 θ_i，假设法矢量 $\boldsymbol{n}_i$ 与 X 轴正向的夹角为锐角时 θ_i 为正，法矢量 $\boldsymbol{n}_i$ 与 X 轴正向的夹角为钝角时 θ_i 为负，对于整个曲线上的刀触点位置，有效切削角度 $\boldsymbol{\Phi}$ 必须满足

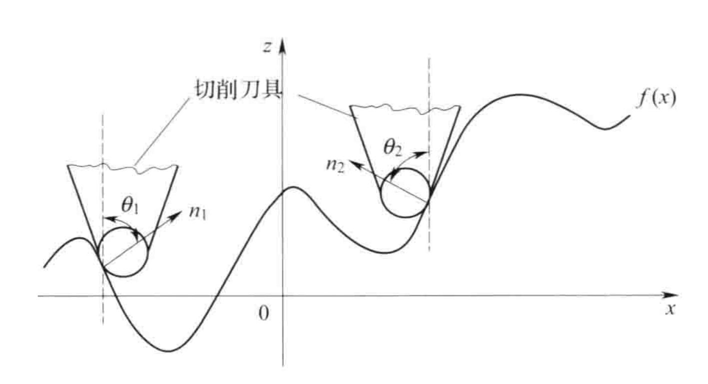


图4-93 有效切削角度计算示意图

$$\Phi \geqslant \theta_{max} + (-\theta_{min}) \tag{4-72}$$

其中，θ_{max} 为最大正夹角，θ_{min} 为最大负夹角。历经所有截面交线的所有刀触点，得到有效切削角度的集合 $\{\varphi\}$，那么刀具的最小有效切削角度 $\boldsymbol{\Phi}$ 必须满足

$$\Phi \geqslant \{\varphi\} \tag{4-73}$$

当 $\max\{\varphi\} \leqslant \Phi \leqslant 2\max\{\theta_{max}, -\theta_{min}\}$ 时，意味着在加工时刀具需要偏置才能保证不超过有效切削角度范围，偏置角度为 $(\theta_{max}+\theta_{min})/2$，当 $\Phi \geqslant 2\max\{\theta_{max}, -\theta_{min}\}$ 时，刀具不需偏置便可加工。一般选取刀具有效切削角度 $\geqslant 2\max\{\theta_{max}, -\theta_{min}\}$ 方便装夹刀具。

4.5.3.3 刀具前角、后角的选择

假设自由曲面工件表面任一周向截面曲线方程为 $f(x)$，如图4-94所示，那么为了保证在切削过程中不产生干涉，刀具前后角必须满足的条件是：沿着切削方向（图中为 X 轴负方向），刀具前角的正切值必须大于截面曲线 $f(x)$ 单调递增部分曲线的斜率，刀具后角的正切值必须大于截面曲线 $f(x)$ 单调递减部分曲线的斜率，即

$$\tan\gamma > \min\{f'(x)\}, \tan\alpha > \max\{g'(x)\}$$

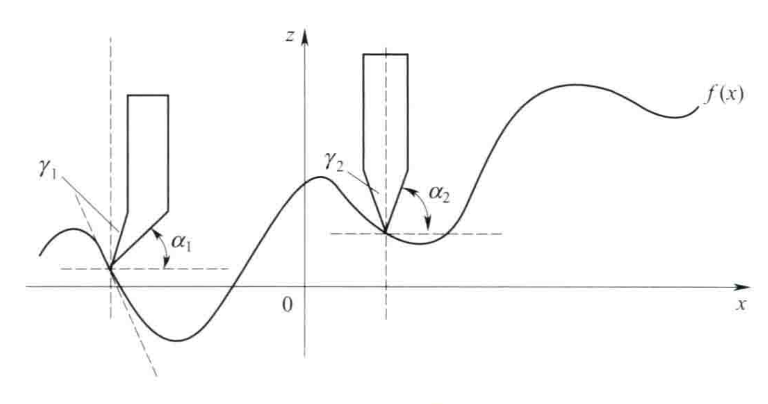


图 4－94　刀具前角、后角计算示意图

然后历经所有的周向截面曲线，得到最小前、后角分别为 $\gamma_{\min}$、$\alpha_{\min}$，那么选择 $\gamma \geqslant \gamma_{\min}$，$\alpha \geqslant \alpha_{\min}$即可。由于一般情况下曲线 $f(x)$ 为单值曲线，所以当前角为正时不会产生干涉现象。当采用负前角切削时必须判断前角的范围。

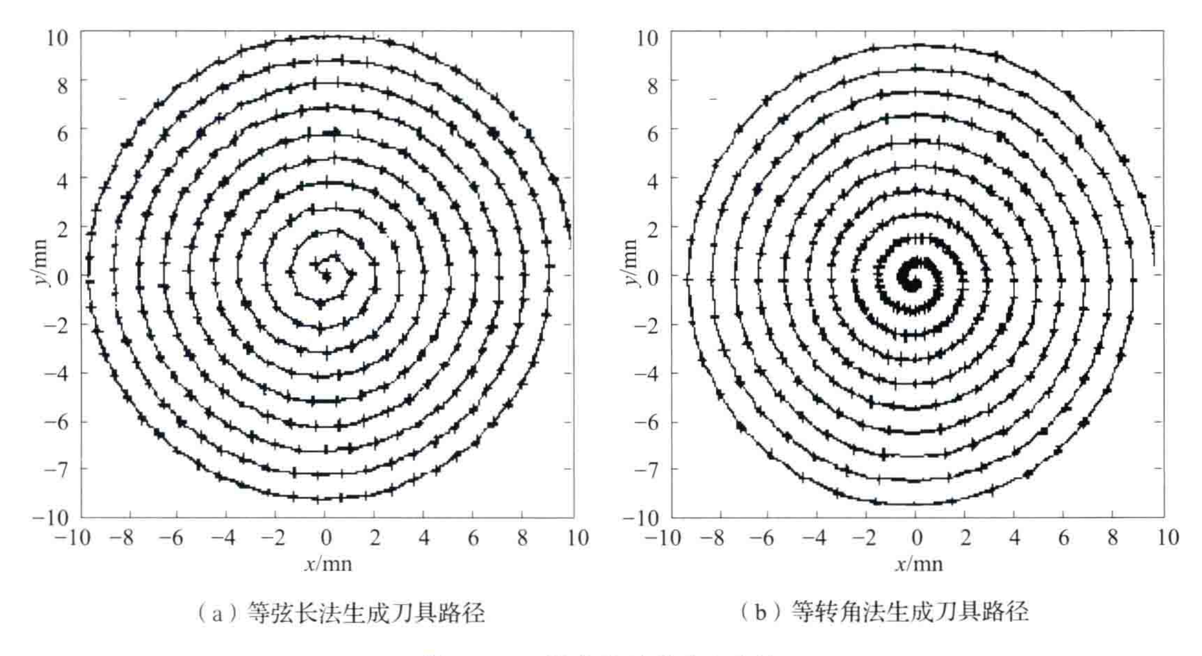
4.5.4　刀具路径生成

确定了自由曲面工件的可加工性并选择确定刀具几何参数后，下一步就是要生成刀具路径，从而编写数控程序，进行加工。刀具路径生成是根据自由曲面的面形表达及所选刀具和走刀方式等进行刀位计算并生成加工运动轨迹。刀具轨迹影响数控编程系统的功能及所生成的加工程序质量。自由曲面慢拖板伺服加工的刀具路径生成方法与自由曲面工件的多轴铣磨加工的刀具路径生成方法不同，必须考虑其加工方法的特殊性。自由曲面慢拖板伺服加工的刀具路径生成方法内容丰富，包括轨迹规划、刀位计算、步长计算与行距控制、干涉碰撞的检测与处理等，研究重点是步长与行距控制、刀位计算及空行程的处理。加工后工件的表面形貌由刀具沿着刀具路径在工件上刻划形成。在得到刀具路径后，理论上可以在加工前预测工件加工质量，指导修改工艺参数和刀具路径。

4.5.4.1　步长和行距的确定

实际加工时刀具不可能遍历整个偏置曲面，而只可能沿它上面的一些有限的曲线轨迹运动，刀具路径生成的过程就是将自由曲面离散化的过程。与自由曲面的铣磨及飞刀加工等多轴加工方法不同，慢拖板伺服加工以柱坐标系描述空间位置，刀具路径中的进给步长是沿着周向的，指的是 *C* 轴的转角步长，行距是沿着径向的，指的是 *X* 轴的进给步长。下面分别讨论转角步长和行距的确定方法。

转角步长的确定一般有等弦长法、等转角法，见图 4－95。等弦长法是按照相邻刀具轨迹点间的弦长相等为规则生成刀具路径；等转角法是按照相邻刀具轨迹点间的转角相等为规则生成刀具路径。可见，采用等弦长法时接近中心位置时的轨迹点数量急剧减少，容易增大加工误差，而采用等转角法时外圈的轨迹点变得稀疏，容易增大加工误差。在慢拖板加工数控程序编制中，一般设定两个轨迹点之间的时间始终固定。那么等弦长法生成的刀具轨迹由于两点间的角度变化，*C* 轴的速度也随之变化，*C* 轴存在加速度。而等转角法生成的刀具轨迹能保证 *C* 轴的速度均匀。因此，从是否产生加速度的角度来看，等转角法优于等弦长法。同时，等转角法计算非常简单，计算速度快于等弦长法。



（a）等弦长法生成刀具路径　　（b）等转角法生成刀具路径

图 4－95　转角步长的确定方法

在选择转角步长时，必须综合考虑优化各种因素。显然，转角步长选的越小，离散点越密集，有利于增加加工的精度。但随着转角步长的不断减小，两点间的加工时间也不断减小，有可能超过控制系统的计算周期，导致程序无法运行。而且加工精度并不与转角步长成比例关系，程序量却与转角补偿成比例关系。所以在选择转角步长的时候要综合考虑控制系统的计算周期、加工精度和程序量等因素。

行距的确定有等弧长法和等参数法两种方法。等孤长法是使相邻的离散点之间的弧长相等，等参数法是使相邻离散点之间的 x 轴增量相等。等弧长法生成的 x 向进给量随着曲面径向曲率的变化而变化，x 轴进给速度随之变化，x 轴存在加速度。等参数法生成的 x 向进给量恒定，保证了 x 轴的进给速度恒定。从是否存在加速度的角度来说，等参数法优于等弧长法。同时，等参数法计算非常简单，计算速度快于等弧长法。

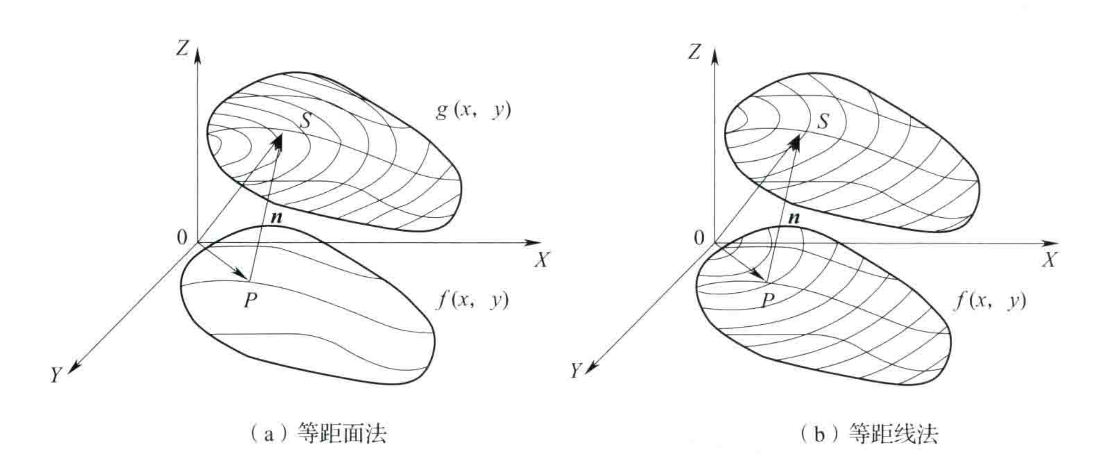
综上所述，一般采用等转角法和等参数法确定 XC 平面上的刀具轨迹点，然后代入自由曲面的面形表达式中，求解得到 z 轴的位置，从而得到三维的刀触点路径。

4.5.4.2　刀位轨迹的生成方法

慢拖板伺服加工数控程序中存储的坐标轴位置信息对应的是刀位点坐标而不是刀触点坐标，因此，在得到刀触点轨迹后，还必须将轨迹进行偏置，生成刀位点轨迹，从而生成数控程序指令。慢拖板伺服加工的刀位点轨迹生成方法主要有以下两种，如图 4－96 所示。

第一种方法是等距面法。该方法先得到自由曲面的等距曲面，再将 XY 平面螺旋线轨迹沿 Z 轴投影到自由曲面的等距面，得到相应的刀位点轨迹曲线；

第二种方法是等距线法。先将 XY 平面螺旋线轨迹沿 Z 轴投影到自由曲面，得到相应的刀触点轨迹曲线，然后再将刀触点轨迹曲线沿着曲面的法线方向作等距线，得到刀位点轨迹曲线。



（a）等距面法　　（b）等距线法

图 4-96　刀位点轨迹生成的两种方法

两种方法虽然只是等距和投影的顺序不同，但得到的刀位点轨迹曲线完全不同。等距面法得到的刀位点轨迹在 XY 向投影是规则的螺旋线，即机床 X 轴每转进给量是常数，X 轴匀速运动。等距线法得到的刀位点轨迹的 XY 向投影不是规则的螺旋线，即机床 X 轴每圈的进给量变化，X 轴存在微小幅值的往复振动。显然，等距线方法对机床 X 轴的动态性能提出了更高的要求。由于机床 X 轴上安装有气浮主轴、工件和夹具等，重量较 Z 轴有明显的增加，动态特性大大下降，所以通常采用等距面法用动态特性好的 Z 轴承担往复运动。

4.5.5　空行程的处理

在慢拖板伺服加工中，时常会遇到车削非圆端面的情况。刀具以螺旋线的轨迹运动，而工件端面非圆，此时刀具会出现空行程，实现断续切削。由于空行程部分不存在曲面的形值点，因此这部分的刀具轨迹规划非常灵活。刀具在空行程部分虽然不参与切削，但空行程部分的刀具轨迹对机床的动态性能产生直接的影响，从而影响工件加工质量。因此，空行程部分的刀具轨迹生成方法的研究对加工质量的控制具有重要意义。

研究空行程部分的刀具路径生成方法，关键是对刀具在空行程部分的轨迹制定相关的规定。可以在二维和三维两个维度上制定规定，从而有两种空行程刀具路径的生成思路。在二维制定规定就是根据已有的刀具轨迹曲线，插值出空行程部分的刀具轨迹曲线，属于曲线插值的范畴。在三维制定规定就是根据已有的面形表达区域，插值出空行程部分的面形表达，从而根据面形计算得到空行程部分的刀具轨迹曲线，属于曲面插值的范畴。

三维插值的方法生成空行程刀具轨迹曲线。此方法的思想是将非圆端面空行程部分的面形表达补足，得到圆形端面，然后根据面形表达计算得到刀具轨迹曲线。对于空行程部分的面形表达，现行方法中比较流行的有以下几种。

①按原面形延展：即按照非圆端面方程的描述将空行程部分填满，然后生成刀具轨迹。

②按水平面延展：即将空行程部分全部按照水平面进行延展，得到刀具轨迹。

③按斜平面延展：即将边缘部分倾斜率作为延展用斜平面的斜率，然后用此斜平面填满空行程部分，得到刀具轨迹。

④按对称延展：即以工件面形对边缘部分的中心对称的面形将空行程部分填满，得到刀具轨迹。

4.5.6　插补和数控程序生成

根据工件的面形生成刀位点轨迹后，就可以编制数控程序用于机床加工。机床通过特定的插补算法实时计算出相邻刀具轨迹点之间的空间轨迹。插补算法的好坏直接影响加工后工件的面形精度。在自由曲面的慢拖板伺服加工中，插补算法还要满足机床的动态性能要求。普通数控机床的直线插补和圆弧插补显然不能用于慢拖板伺服加工中，因为用这两种插补算法插补出的曲线在插补点处都不是二阶连续的，即在每个插补点处都会产生额外的加速度，影响机床直线轴的响应。同时，这两种方法对自由曲面的逼近会产生较大的误差。

对于慢拖板伺服加工的插补算法，必须满足以下条件：保证插补出的曲线二阶连续并且曲线逼近误差小。慢拖板伺服加工机床所用的插补算法可称为PVT插补算法，即根据前一插补点位置$P_1(x_1, y_1)$、后两个插补点的位置$P_2(x_2, y_2)$、$P_3(x_3, y_3)$及其$P_1(x_1, y_1)$点处的速度矢量$\boldsymbol{V}_1$，计算得到$P_2(x_2, y_2)$点位置的速度矢量$\boldsymbol{V}_2$。又已知两点间的时间间隔为T，计算同时满足两插补点位置、速度和时间间隔的插补曲线。所得出的插补曲线保证了二阶连续，同时，由于计算时考虑了后两个插补点的位置，因此避免了插补出的曲线剧烈变化的现象，PVT插补算法可以在较大的离散间隔下获得很好的曲线逼近精度。

在慢拖板伺服车削中，工件材料特性、刀具几何形状、切削用量的选择和刀具及其与工件间相对振动影响工件最终的表面粗糙度，对刀误差、插补误差和轨迹跟踪误差将影响工件最终的面形精度。

第5章　特殊材料及复杂形状零件的超精密加工技术

超精密加工技术应用范围广泛，从软金属到淬火钢、不锈钢、高速钢、硬质合金等难加工材料，到半导体、玻璃、陶瓷等硬脆非金属材料，几乎所有的材料都可利用超精密加工技术进行加工。随着超精密加工技术的发展，一些硬脆材料如硅、锗等，可以通过超精密车削替代原来的研磨抛光工艺，同样能得到高质量的表面；黑色金属也可以通过材料及工艺的改进实现金刚石超精密切削。同时随着非球面、自由曲面以及微结构功能表面等复杂形状、复杂结构光学元件应用领域的扩展，对超精密加工技术也提出了新的要求。

5.1　黑色金属超精密切削技术

单点金刚石超精密车削技术作为超精密加工技术的一个典型代表，具有良好的可控性，不仅可以获得亚微米级的形状精度，还可以获得纳米级的表面粗糙度，因而成为加工精密机械、光学器件最重要的方法之一。目前，成功应用于单点金刚石超精密切削技术的典型材料有金、银、铜合金、铝合金、镍磷合金及复合材料、高分子材料和部分红外材料等。然而，当切削 Fe、Ni、Cr、Ti 等门捷列夫元素周期表第 IV ~ VIII 族过渡金属材料时会导致金刚石刀具产生严重的化学磨损，这些材料被认为是金刚石不可切削材料。但属于黑色金属的钢铁材料作为用途最广泛的工程材料，以其成本低廉、功能多样化而备受超精密加工领域的重视。若金刚石刀具用于黑色金属的超精密加工并且其磨损能够得到有效抑制，则必将引起先进制造业的革命并产生重大的社会和经济效益。

5.1.1　黑色金属超精密切削加工时单晶金刚石刀具的磨损机理

一般认为用单晶金刚石刀具超精密切削加工黑色金属时，由于刀具的快速、严重磨损而无法完成正常加工，因此黑色金属不适合用单晶金刚石刀具进行超精密切削加工。目前通常采用立方氮化硼（CBN）、精密陶瓷等传统刀具对其进行精密加工，但受刀具机械物理性能的制约，无法加工出表面粗糙度及形状尺寸精度均达到超精密级的零件。

金刚石刀具在切削黑色金属时的磨损机理大致分为四类，其中黏着、积屑瘤的形成以及磨粒磨损、微崩刃、断裂和疲劳可以统称为机械磨损，而摩擦热磨损和摩擦化学磨损可以统称为热化学磨损。由于天然单晶金刚石具备诸如极高的硬度、摩擦因数小、导热性好、耐磨损等物理化学特性，以及通常情况下超精密加工所满足的环境条件和高质量的冷却系统，机械磨损对于金刚石刀具切削黑色金属的整体磨损来说是极小的一部分，而热化学磨损是造成金刚石刀具不可以切削黑色金属的最主要原因。

（1）机械磨损

机械磨损主要是由于碳化物的硬质颗粒，包括加工过程中形成的积屑瘤以及切屑对刀

具产生的磨损，由于金刚石是自然界最硬的材料，所以这种磨损方式只占金刚石刀具磨损中的极小部分，绝不是主要原因。此外由于金刚石刀具在刃磨、抛光后的表面及亚表面产生的损伤，金刚石颗粒内部组织结构存在的缺陷，以及金刚石刀具加工后的残留应力等存在，在加工过程中易产生疲劳或断裂，这称为疲劳磨损或断裂破损，通过改进金刚石刀具的刃磨工艺可有效减缓或避免此类磨损的发生。

（2）热化学磨损

热化学磨损可以理解为金刚石刀具切削黑色金属材料时在一定接触压力下产生摩擦和大量热，从而引起金刚石正四面体结构这种亚稳定状态向更为稳定的片层状结构转化而成石墨，这种现象被认为是刀具磨损的前兆。随后石墨化的碳原子扩散到工件表面里，与空气中的氧等活性原子以及工件中的亲和性化学元素形成碳化物和氧化物。其中，亚稳态向稳态转化是金刚石石墨化的内因，而压力、温度、铁等过渡金属元素以及氧等活性气氛的催化作用和新形成的洁净表面的增强活性作用等都属于外因。在连续切削过程中，切削刃与黑色金属材料紧密接触，而且超精密机床带有高质量的冷却润滑系统，所以压力、氧等活性气氛以及新形成的洁净表面的增强活性等因素对金刚石石墨化的影响都将得到较好缓解。而铁等过渡金属元素是石墨化反应的高效催化剂，可以将金刚石发生石墨化所需温度从 1800K 降低到 1000K 左右。因此，外因中切削界面的温度是第一位的，而铁等过渡金属元素的催化作用是第二位的，其他因素较次要。

热化学磨损包括摩擦热磨损和摩擦化学磨损，具体体现在以下几方面。

①石墨化：金刚石刀具与工件接触面积小，摩擦界面温度很高，使金刚石发生组织结构转变为石墨，导致硬度下降，受热磨损。此时碳原子从金刚石正四面体结构中被铁原子拖曳出来渗入到钢铁材料中，而金刚石原有的亚稳定状态结构则生成更稳定的石墨片层状结构。石墨化主要由四种因素引起：界面的高温、高于金刚石稳定范围的压力、铁和活性气氛的催化作用、加工过程中新形成的洁净表面的增强活性作用。

②黏滞磨损：金刚石刀具中的碳原子和钢铁材料中的铁原子具有很强的化学亲合力，随着石墨化的碳原子渗入工件材料，造成强烈的黏滞现象，所以金刚石刀具摩擦表面上的少量材料黏附在工件表面上而被带走。

③物理化学磨损：在铁元素催化作用下，920K 左右金刚石就会发生碳化，在氧元素和铁元素作用下，1100K 金刚石发生氧化。所以切削过程中在高温作用下，金刚石刀具晶粒发生分解，部分碳原子向钢铁材料扩散，金刚石材料脆性增大、硬度下降，从而加剧了磨损。热化学磨损是金刚石刀具切削黑色金属的主要磨损机理。

5.1.2　减少金刚石刀具磨损的方法

为解决金刚石刀具切削黑色金属时产生严重磨损这一制造领域难题，国内外研究人员围绕着整个加工系统中的加工工艺、刀具和工件材料这三个基本组成部分，以实现金刚石加工黑色金属的低刀具磨损、高表面质量和高形状精度为目标，分别从加工工艺的改善、刀具的改善、工件材料的改善以及它们的复合改善四个方面入手展开了深入、系统的研究，一些方法得到了进一步发展，同时新的方法不断涌现。

（1）改善加工工艺

从改善加工工艺入手，各国研究人员主要尝试了保护性气氛切削、低温切削、超声振

动切削等方法。

美国、德国等国的学者尝试了分别以 CH_4、C_2H_2、CO_2、CO 等作为保护气体，在碳饱和条件下进行超精密切削加工试验来抑制化学反应；或者采用惰性气体保护进行切削加工钢铁材料，发现刀具磨损和表面质量都没得到明显改善。这主要是由于在切削过程中工件材料和刀具表面接触紧密，富碳或惰性保护气体不能完全和金刚石刀具刃口接触，很难起到有效的保护作用，造成了金刚石刀具较大程度的磨损。因此，在保护性气氛中切削的方法无论从原理上还是效果上与实用阶段还相差甚远。

针对黑色金属超精密切削时金刚石刀具热化学磨损的机理，国内外学者都尝试了低温切削黑色金属的工艺，将液态氮、液态二氧化碳和被干冰冷却的酒精分别被直接喷射到切削区来降低化学反应的速率，试验结果表明金刚石刀具的磨损得到了较好的抑制，获得了较好的效果。但是，由于低温切削时温度梯度大，很容易引起工艺系统冷缩变形，导致加工精度的降低，从而限制了这种工艺方法在超精密加工中的实际应用。

振动辅助加工从 20 世纪 60 年代由日本学者隈部淳一郎提出，一直被认为是一种用于难加工材料的有效方法。近年来也开始应用于黑色金属超精密切削加工，国内外学者先后提出了一维（线性）和二维（椭圆）超声振动切削方法来减少金刚石刀具和工件的接触时间，取得了较好的加工效果。在此基础上，又相继开发了两自由度和三自由度的椭圆超声振动切削系统。研究结果表明，此方法对金刚石刀具磨损的抑制相比其他方法而言效果较好，已经成为众多解决方法中最有希望的方法之一。

但是这种工艺也有一些局限性，例如，超声振动方法的加工效率比较低；目前，受变幅杆形状和尺寸的影响，一维超声振动切削的可加工直径范围较小，而且在加工凹形截面的零件时存在干涉现象（见图 5－1），因而不适合加工较深凹形零件以及一般形状的自由曲面；二维超声振动切削虽然可以加工一般形状的自由曲面，但是在加工过程中存在的自激振荡和超声振动会对工件表面引入波纹，加工后工件的表面粗糙度较难稳定地满足生产中的实际需要。

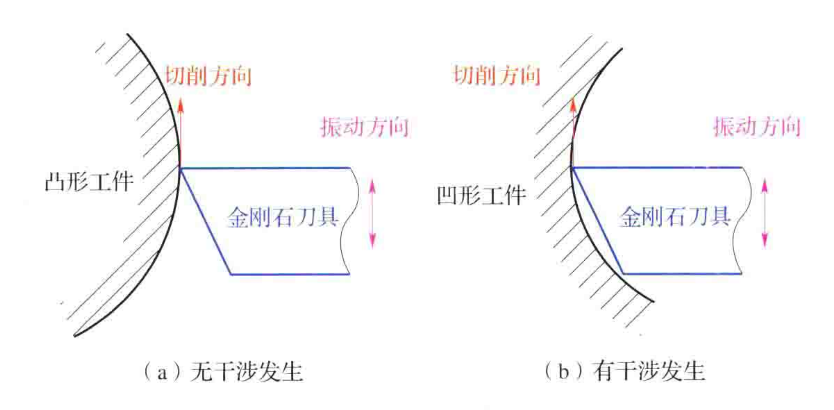


图 5－1　振动辅助加工不同截面形状的工件

(2) 改善刀具

从改善刀具入手，各国研究人员主要尝试了保护性涂层、离子注入、金刚石刀具的替代品研制等方法。

在金刚石表面采用物理气相沉积法形成 TiN、TiAlN、AlN 等涂层来增强刀具性能，但效果不明显。涂层构成了刀具碳原子扩散的屏障，虽然对刀具起到了一定程度的保护，但

它会造成金刚石刀具刃口半径加大、变钝，最重要的是涂层的附着强度和抗磨粒磨损性能较低，导致在加工过程中容易脱落、破损，很难达到实用化的程度。

采用高能将氮离子、铬离子、钛离子等分别对单晶金刚石表面进行注入改性，虽然理论分析离子注入对磨损性能有较大的改善，但是进行切削试验发现抑制磨损的效果相比未经离子注入的刀具并没有明显改善，有的甚至还差。其原因可能是离子注入金刚石虽然改善了其晶格，但同时也在其表面引入了缺陷，使得离子注入改性层的抗磨粒磨损性能远远达不到切削加工的实际需要。

尽管金刚石刀具具有硬度极高、导热性极好、刃口可以做得非常锋利等优点，但它毕竟非常稀少而且昂贵，最重要的是在加工黑色金属时遭受着严重的化学磨损。因此，一些科研人员探索了采用其他材料替代金刚石来制作用于超精密加工刀具的可能性。聚晶金刚石（PCD）和化学气相沉积（CVD）刀具通常用于有色金属、塑料和复合材料的加工，由于在切削黑色金属时也同样产生严重的化学磨损，所以也不推荐使用。单晶 CBN 刀具和烧结 CBN 刀具（相对于钢铁材料具有很高的化学稳定性）用于钢铁材料的超精密加工，尽管获得了镜面级的表面质量但刀具磨损很快；采用纳米级晶粒的 CBN 刀具和陶瓷刀具加工钢铁材料，但后刀面磨损程度与金刚石刀具相当。上述金刚石刀具的替代品尽管有较高的化学稳定性，但在刃口锋利程度和抗磨粒磨损性能方面还存在较大的问题，与实用化的程度还有些距离。

（3）改善材料

表面改性方法用于超精密加工领域始于对镍磷合金的加工。有人用化学沉积或直流电镀的方法在镍材料表面获得一层镍磷合金，发现金刚石车削镍磷合金层时刀具磨损随着含磷量和结晶度的增加而减小；还有人采用反应直流磁控溅射法在 AISIM2 高速钢表面获得了 Ti－Cu－N 涂层并研究了不同钛、铜、氮的含量对涂层硬度和温度稳定性的影响，结果表明氮含量在 7%～22%时能抑制金刚石的粘着和磨损；有学者将此思想进行了延伸，通过离子渗氮处理在钢铁材料表面获得了氮化铁层，然后对氮化铁层进行超精密切削，发现金刚石刀具磨损得到了很好的抑制，在切削 500m 后刀具无明显磨损并获得了 Ra 为 8～12nm 的表面质量。氮碳共渗也取得了较好的效果，天津大学房丰洲教授课题组进一步从材料学角度比较了气体渗氮和离子渗氮效果，探索了渗氮钢中各元素对刀具磨损的抑制作用，发现微量镍、铜、硅、铝有益于抑制刀具磨损，而锰、铬、钼等元素起负作用；哈尔滨工业大学赵清亮教授的课题组采用稀土催渗法对AISI 4140 进行离子渗氮，并成功加工出了菲涅耳微结构，扩展了金刚石切削技术在钢铁材料中的应用。总之，表面改性方法抓住了钢铁材料中铁等过渡金属元素原子，使其与渗入元素形成了化合物，从而抑制了其对金刚石石墨化的催化作用，在超精密加工中取得了较好的效果，同时化学热处理工艺快捷、成本低而且渗氮层提高了工件表面耐腐蚀性。但也存在一些问题，如渗层厚度小、化合物层中会产生硬质点导致刀具机械磨损、渗氮温度较高会引起工件不均匀热变形等。

（4）复合改善

鉴于以上三类方法都分别取得了一定的效果，各国学者纷纷尝试将它们组合进行复合改善。例如尝试低温切削与椭圆振动切削的组合，这种组合提高了表面质量，但与低温切削相比在减少刀具磨损方面没有明显改善。还可以采用了富碳气氛与超声振动切削的组合方式，在 CO_2 保护气氛中切削 2000m 后刀具后刀面磨损小于 5μm，表面粗糙度 Ra 小于

0.15μm；也尝试了 CO_2 保护气氛与植物油和 CCl_4 组成的切削液相结合的方式，与上述单独超声振动切削的效果相比没有得到显著改善。哈尔滨工业大学赵清亮教授的课题组尝试了工件表面改性与超声振动切削的组合，这种组合也没有显著提高表面质量或减少刀具磨损，由于渗氮增加了工件硬度还导致了刀具出现微崩刃现象。日本理化学研究所提出了一种离子喷射冷却系统用于超精密加工钢铁材料，一方面这种离子喷射冷却剂可以对工件表面改性使之产生约200nm厚的软化层，从而可以进行塑性切削；另一方面，切削参数和离子喷射冷却剂中碳颗粒密度的合理搭配可以在刀具表面产生一种保护层，从而阻止了刀具和工件材料的直接接触。这种方法属于一种工件表面改性与刀具保护涂层组合的方法，但无法完全避免刀尖与工件材料直接而连续的接触，因此，这种方法离实用化程度相去甚远。

表5-1是对四类典型方法按刀具磨损、切削距离或面积、表面质量以及潜在的问题进行的定性和定量归纳总结。

表5-1 金刚石超精密切削钢铁材料的典型解决方法的比较

方法＼表征		刀具磨损	切削距离或面积	表面粗糙度	潜在的问题
改善加工工艺	低温切削	无明显磨损（刃口半径 $r_\beta < 40nm$）	$<1000mm^2$	$Ra<25nm$	温度梯度大，引起工艺系统冷缩变形，破坏超精密加工环境
	在保护性气氛中切削	较明显磨损	$3in^2$	$Ra<12.5nm$	金刚石中碳原子与工件中金属元素的杂化仍旧存在
	超声振动切削	磨损较小	2250m	$Ry<0.05\mu m$	效率低，加工凹形截面工件时存在干涉
	电场辅助加工	—	—	—	尚未有相关试验数据报道，比较难于实现
改善刀具	保护涂层	3μm	1130mm	—	抗磨粒磨损性能差
	离子注入	6μm	1130mm	—	抗磨粒磨损性能差
	金刚石刀具的替代品（纳米级晶粒CBN或陶瓷刀具）	约100nm左右	2~3km	$Rz<100nm$	抗磨粒磨损性能差，切削刃不够锋利
改善工件材料	工件表面改性	无明显磨损（刃口半径：40nm增至120nm）	500m	$Ra8\sim12nm$	不均匀热变形，渗氮层较浅，高硬质点引起金刚石刀具微崩刃或磨粒磨损

表 5-1（续）

方法＼表征		刀具磨损	切削距离或面积	表面粗糙度	潜在的问题
复合改善	低温切削与椭圆振动切削的组合	<0.5μm	1000m	$Ra=30$nm	与低温切削相比，刀具磨损无明显减小
	富碳气氛与超声振动切削的组合	<5μm	2000m	$Ra<0.15$μm	与椭圆振动切削相比，无显著提高
	工件表面改性与超声振动切削的组合	无严重磨损	150m	$Rz=30$nm	与椭圆振动切削相比，无显著提高
	工件表面改性与保护涂层的组合	约 65μm	—	$Ra=15.3$nm	刀尖仍旧与工件直接、连续地接触

从表 5-1 中可以看出，文献所显示的评价指标以及数据的单位不尽相同，如分别采用在切削一定距离或面积之后的 VB 值、磨损体积或定性方式来评价刀具磨损；分别采用 Ra、Ry、Rz 等来评价表面质量。另外，具体试验条件（机床精度、切削液的使用等）、切削参数、刀具参数、工件材料（成分、性能）等也都不尽相同。因此，所报道的数据只能提供一定程度的参考，无法严格用来比较各种解决方法的优劣，而且每种方法都存在一定的潜在问题。

综上所述，尽管超声振动切削和工件材料表面改性方法的组合对金刚石刀具磨损和工件表面质量没有产生进一步改善，但它们各自已经分别展现出了良好效果，在切削较长距离或较大面积之后刀具磨损仍然能达到可以接受的程度。

5.1.3　典型表面改性模具钢材料超精密切削加工工艺

5.1.3.1　表面改性渗入元素的选择

表面改性技术是在保持材料或制品原性能的前提下，采用化学的、物理的方法改变材料或工件表面的化学成分或组织结构，以提高材料或机器零件性能或赋予其表面新的性能的一类材料处理技术。目前，表面改性方法的作用机理被认为是利用所选渗入元素与黑色金属材料中对金刚石刀具磨损具有催化作用的铁等过渡金属元素键合在一起形成新的稳定物质，即用渗入元素把铁等过渡金属元素抓住从而抑制其与金刚石晶格中的碳原子发生化学反应，同时化合物层硬度对刀具磨损影响不大。

新渗入元素的选择需要考虑的因素有：

①能够形成铁等过渡金属元素的化合物；

②化合物稳定、在较高切削温度下不容易热分解；

③避免小孔等缺陷以及过硬硬质点的产生。

渗氮以及氮碳共渗已经能比较有效地阻止金刚石刀具磨损。在门捷列夫元素周期表中与 N 同周期化学性质相似的元素有 B、O，但因为 O 元素在较高切削温度下可加速金刚石刀具磨损形成氧化物、碳化物的可能，所以不应考虑；与 N 同族的元素有 P 等，但 P 以

下元素不易形成铁的化合物，同时磷化铁不稳定，所以不应考虑；与 B、O 同族且有利于形成铁化合物的元素还有 Al、Si、S，但渗硫容易形成疏松小孔，不适合金刚石车削。基于以上考虑，选择 B、N、Al、Si 作为新的渗入元素。

5.1.3.2 试验条件及及试验装置

试验在超精密数控车床（Nanotech 250UPL）上进行（见图 5－2），工件直径为 20mm；天然单晶金刚石刀具参数为：刀尖圆弧半径 0.5mm，刀具前角 0°，刀具后角 15°；切削参数为：主轴转速 1500r/m，进给速率 3mm/min，切削深度 3μm；冷却液：干切；切削长度约为 150m。

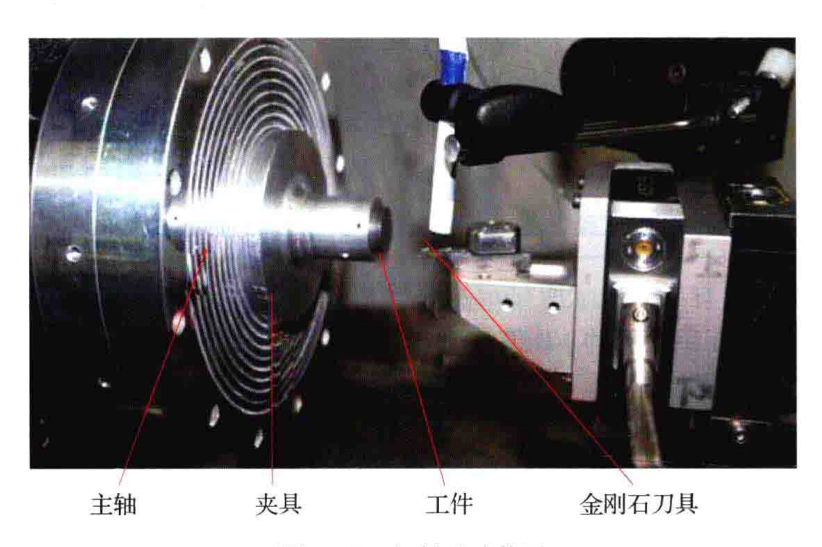


图 5－2 切削试验装置

工件材料：STAVAXESR（S－136）模具钢，新渗入元素包括 B、N、AL、Si，化学热处理工艺在此不再赘述。

5.1.3.3 试验结果及讨论

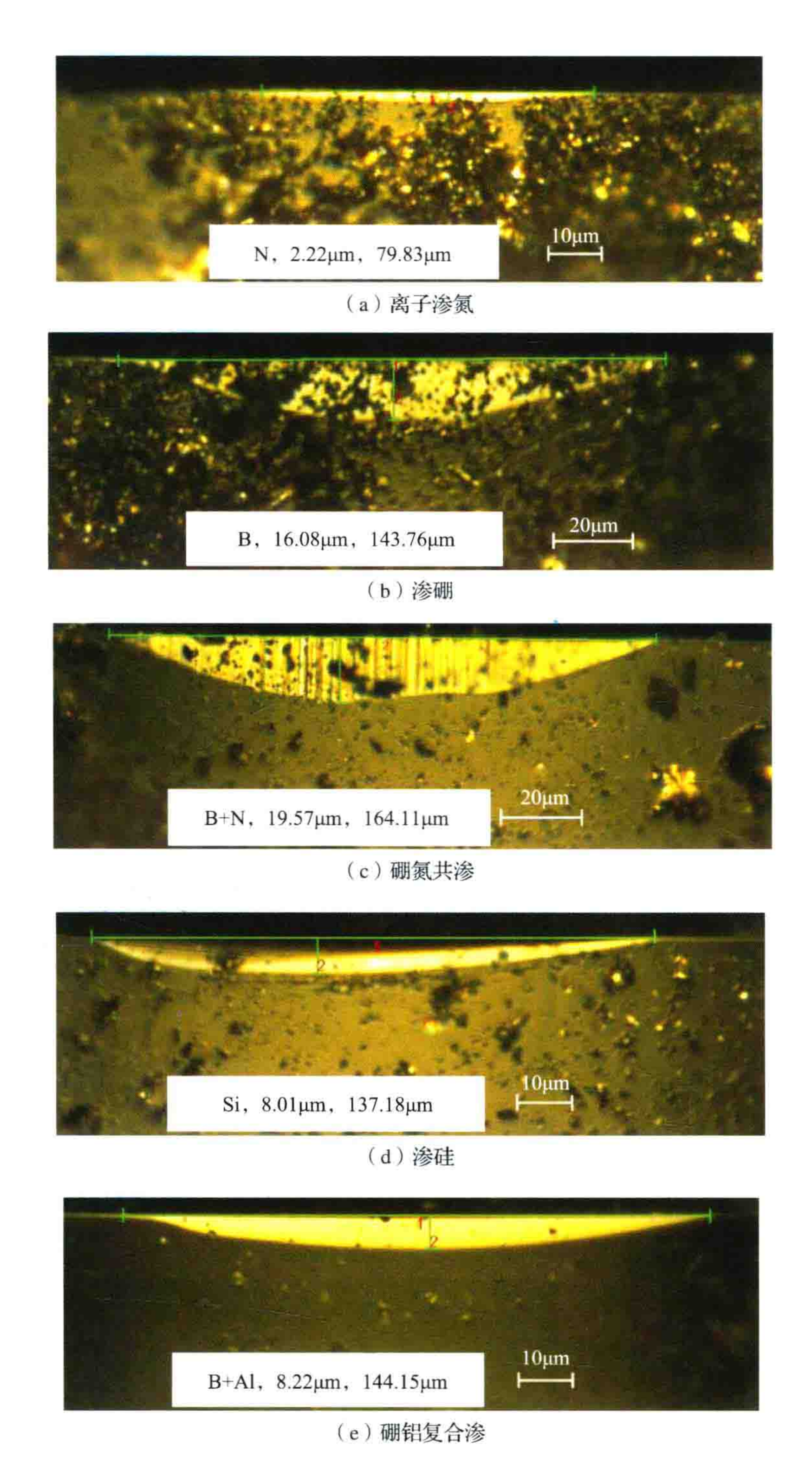
（1）金刚石刀具磨损

刀具磨损主要与切削条件、刀具几何角度以及材料成分等因素有关。金刚石切削经表面改性的钢材所产生的刀具磨损如图 5－3 所示。图中标注文字从左到右依次为渗入元素、磨损带宽度、磨损带长度和标尺。

由图 5－3 可以看出：

①不同化学热处理工艺虽然都抓住了铁等过渡金属元素，但对钢件的金刚石可切削性的影响差异非常大，化合物层成分与金刚石可切削性直接相关；在相同干切削条件下，渗氮钢切削效果较好，后刀面 VB 值分别为 2.22μm（STAVAXESR），并且磨损带长度也较小（小于 80μm）。部分因素可能是化学热处理工艺的区别所致，离子渗氮工艺对工件表面几乎无损伤而且通过溅射氮离子还可以使工件表面更清洁；而固体粉末渗法中的渗剂可能黏附在工件表面反而增加了表面粗糙程度，致使在切削时与金刚石刀具接触面积较大从而产生了较大的磨损带长度（大于 140μm）。

②与原始材料相比，渗氮处理的 STAVAXESR 其金刚石可切削性虽然得到了显著改善，但由于是干切削，刀具还是存在一定程度的磨损，而且主要是磨粒磨损。如果配合使用矿物油微量润滑，磨损情况将会得到进一步改善。



（a）离子渗氮

（b）渗硼

（c）硼氮共渗

（d）渗硅

（e）硼铝复合渗

图 5－3　金刚石切削经表面改性的 STAVAXESR 产生的刀具磨损

③在表面改性钢中，渗硼以及硼氮共渗对金刚石刀具磨损影响最大，几乎接近切原始钢材的程度，但其磨损机理完全不同。图 5－3（c）中磨损面上的竖直纹理显示出表面改性之后铁等过渡金属元素被渗入元素抓住，形成了较硬化合物层，从而抑制了金刚石刀具化学磨损，而磨粒磨损成为主导。后刀面一旦出现磨损，切削力将会增大，同时温度将会

上升，这样反过来又会使刀具磨损加速。

（2）工件表面质量

被加工件表面质量主要与材料性质、刀具几何角度、切削条件、最小切削厚度以及振动等因素有关，表面质量对零部件的功能和寿命起着至关重要的作用。不同表面改性的钢材经金刚石刀具车削后的表面质量如图5－4所示。

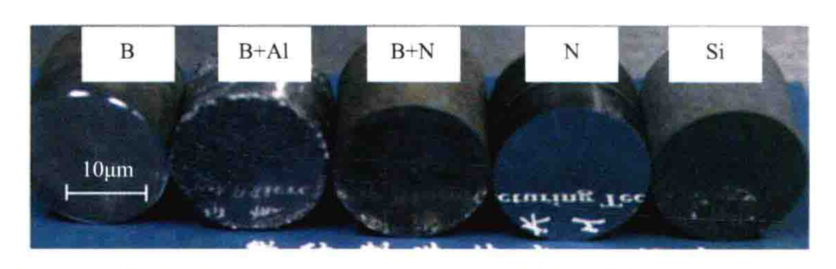


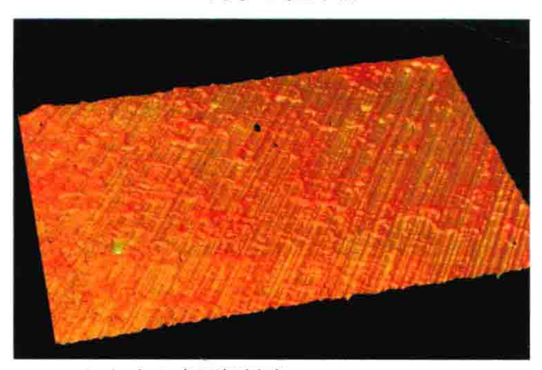
图5－4　不同表面改性的STAVAXESR经金刚石刀具车削后的表面质量

由图5－4可以看出：

①表面质量与不同化学热处理工艺所形成的化合物层之间的关系基本与刀具磨损对应一致。在相同干切削条件下，渗氮钢表面呈现出镜面质量，从外侧到中心表面粗糙度 Ra 为6.72～32.55nm（STAVAXESR），同时其表面上的纹理特点印证了刀具磨损主要是磨粒磨损，参见图5－5。

三维交互式显示器

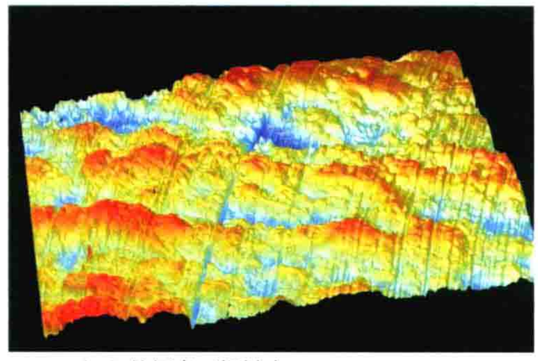
表面状态
Ra：6.72nm
Rq：9.28nm
Rt：332.90nm



（a）中心表面粗糙度

三维交互式显示器

表面状态
Ra：32.55nm
Rq：39.50nm
Rt：264.56nm



（b）外侧表面粗糙度

图5－5　金刚石切削经表面处理的STAVAXESR产生的表面形貌及粗糙度

②尽管渗硅和硼铝复合渗的工件表面比较粗糙，但其被加工表面能够局部地反射出清晰的字符且此局部粗糙度 *Ra* 值可达 8nm，而渗硼和硼氮共渗的被加工表面几乎反射不出任何字符。

（3）渗入元素的作用

并非任何金属材料都能达到模具钢的性能要求并能被加工出镜面质量，材料中化学元素的作用和含量对纳米级表面质量和刀具磨损的影响至今还没有被完全解释清楚。表面改性方法使模具钢中的铁等过渡金属元素与渗入元素键合生成了新的化合物，从而有效抑制了金刚石刀具的化学磨损。如上所述，一方面还需要进一步研究新的表面改性工艺以达到更小的热变形、对工件表面无污染和更大的厚度；另一方面，通过上述试验可以发现 N 元素有助于减少刀具磨损、提高刀具寿命，N、Si 和 Al 元素有助于获得光学级质量的表面，而 B 元素对钢铁材料的金刚石可加工性起负面作用。在被加工钢件表面进行改性其实质相当于制造了一种新材料，因此，上述渗入元素的作用可用于适合金刚石切削的新材料的开发。

5.1.4　超声振动辅助金刚石切削

5.1.4.1　超声振动辅助切削特点

振动辅助加工一般是通过某种方式驱动加工刀具或工件沿着某方向在一定频率下往复振动以去除材料的过程。振动辅助加工具有分离特性、冲击特性、变速特性、往复熨压特性。与传统加工方法相比，这些运动特性综合作用产生了以下四个优点。

（1）延长刀具寿命

振动辅助加工与传统加工方法相比，可以大幅度延长刀具寿命。其改善效果已经在 CBN 刀具、硬质合金刀具以及金刚石刀具加工硬脆材料、黑色金属以及有色金属方面得到证明，不同刀具和材料的组合表现出不同的磨损机理。通常采用平均切削力、加工表面粗糙度来评价刀具磨损。振动辅助加工可以有效减小切削力，进而减小可诱发刀具崩刃或破损的内应力，并且如果在刀具和工件分离过程中喷入适量润滑液可使切削力进一步减小。另外，研究表明二维振动辅助加工在相同切削深度、刀具几何角度以及刀与工件组合情况下，比一维振动辅助加工的切削力更小、更能有效延长刀具寿命。

（2）提高表面精度和形状精度

与传统加工方法相比，无论在何种被加工材料或切削深度状况下，振动辅助加工都可以提高表面精度。对于超精密车削光学器件来说，切削深度通常保持在几个微米，所要求的粗糙度等级甚至达到几个纳米（rms）。对于加工尺寸较大的零件来说，振动辅助加工的方式通过抑制刀具磨损可以获得相当高的精度，切削深度可以达到 1mm，同时表面精度可以保持在 10nm（rms）。另外，振动辅助加工也可以抑制颤振，理论上表面精度与横向进给率成正比，而与刀尖圆弧半径成反比。但如果刀尖圆弧半径增加过大，将引起自激颤振。

（3）提高脆性材料的加工效率和表面质量

实际生产中，脆性材料塑性域加工时通常临界切削深度很小，致使材料去除率小并且加工时间较长。振动辅助加工能够使脆性材料在塑性域加工的临界切削深度增加好几倍，从而提高加工效率。同时由于振动辅助加工能减小切削力，进而可以减小加工表面之下裂

纹扩展的深度，或者有效增大临界切削厚度。

（4）显著抑制毛刺生成

毛刺的形成被认为是工件材料在切削变形区与切削刃接触时的瞬时压应力和弯曲应力所致。振动辅助加工能够有效减小切削力，进而可显著抑制毛刺生成。

图5－6显示了沿切削方向振动的一维超声振动切削中刀具和工件的运动过程。工件以一定速度 n 旋转，刀具从工件外侧开始振动并慢慢与工件接触，然后切入工件，直至位置②处。此时刀具振动与工件运动相对速度为0，下一时刻刀具和工件开始分离。当刀具运动到最低点位置③后又开始向工件靠近，并在位置④处重新接触并切入工件，直至位置⑤处刀具和工件又开始分离，如此往复循环。

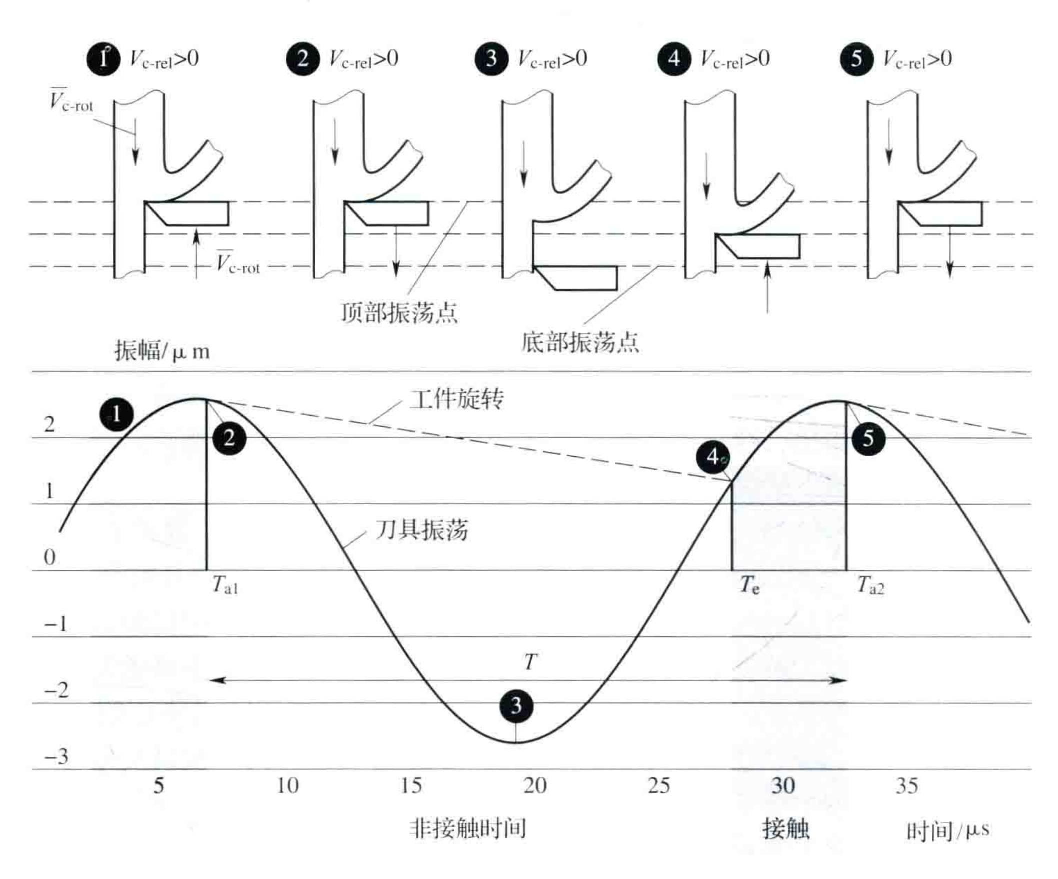
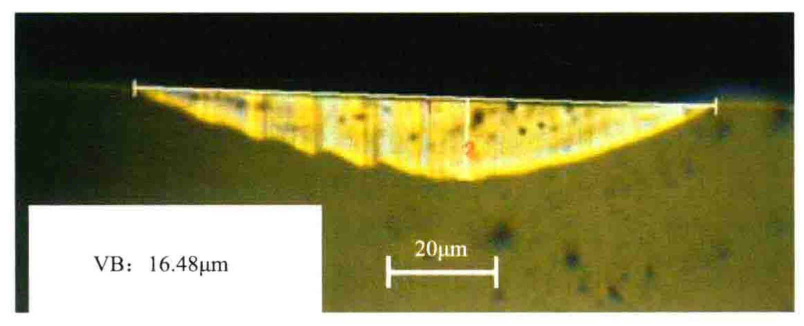


图5－6 超声振动切削的运动学示意图

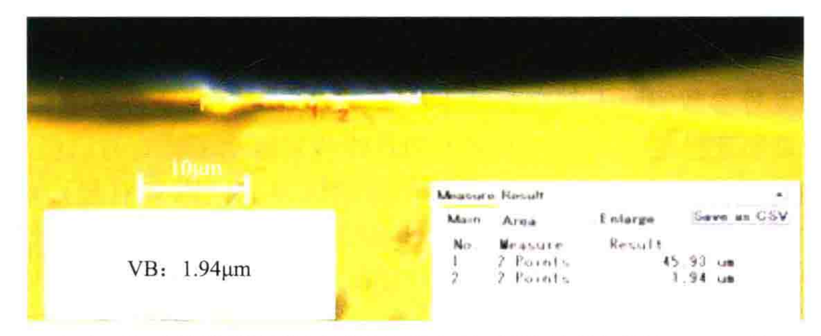
从上图中可以看到，在一个切削周期内，刀具真正参与切削的时间为从①到②，以及从④到⑤，净切削时间在整个周期内的比例称为占空比。占空比在振动切削中是一个具有重要意义的参数，其值若小则说明每个振动周期中刀具的净切削时间所占的比例小，而刀具在大部分时间处于非切削、与工件分离的状态，因此切削热就会相对减少并且分离过程也能起到散热作用。由于有效接触时间减少、刀屑分离散热快，切削液更易发挥冷却润滑作用，从而使切削力和摩擦力减小等。由于上述原因，超声振动辅助金刚石切削黑色金属时的切削温度大幅度下降进而减少了金刚石刀具磨损，这在某种程度上证明了在传统金刚石直接切削黑色金属时切削温度影响是第一位的，铁等元素的催化作用是第二位的。

5.1.4.2 超声切削中切削液对刀具磨损影响

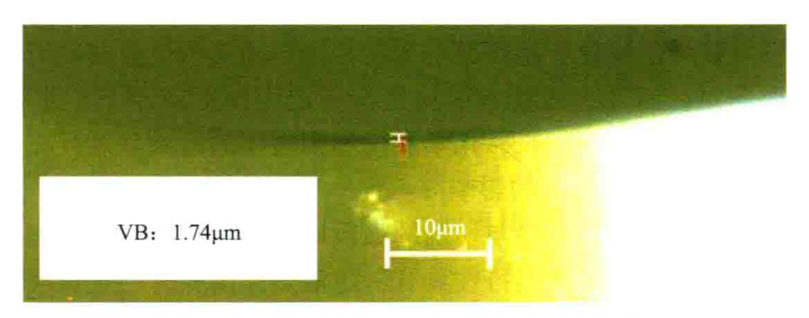
金刚石刀具切削铝、铜合金等时加入酒精、煤油等切削液会改善切削条件，减少积屑瘤的形成及刀具磨损，提高加工表面质量。同样对STAVAX镜面级模具钢进行振动切削试验时，发现与传统金刚石车削相比，在干切削条件下超声振动辅助切削方法已大幅度减少金刚石刀具磨损（如图5-7（a）和（b）所示），如果将超声振动辅助切削方法与微量润滑条件相配合，对刀具磨损的抑制作用更为显著（如图5-7（c）所示）。



（a）传统金刚石车削的刀具磨损（切削面积113 mm²）



（b）干切削条件下超声振动辅助切削的刀具磨损（切削面积约113 mm²）



（c）微量润滑条件下超声振动辅助切削的刀具磨损（切削面积约980 mm²）

图5-7 不同切削模式下的刀具磨损对比

干切削时超声振动切削中刀屑分离过程的散热作用非常显著，到刀具停止运动之时，切削热降低了很多，因此刀屑分离过程中的快速散热很有可能是超声振动切削过程中切削温度降低的主要原因。另外，与干切削相比，水分子层形成的润滑膜在纳米切削过程中起到了实质性的作用，不仅可以减小工件和刀具之间的摩擦力从而起到了润滑作用，还可以降低刀面上产生的切削热从而起到了冷却作用。它将刀具和工件隔离开的同时也使得由刀具磨损引发的切削热得到了有效抑制，从而可延长刀具寿命。尽管界面处的水分子改变了接触应力水平，但随着切削时间和距离的加长，刀尖和工件之间的直接相互作用还是不可

避免。因此，采用水基切削油对切削界面进行冷却润滑，只能使刀具磨损降低，而不能够完全消除。此结论给实际加工的启示是为了让水基切削液充分发挥冷却、润滑以及隔离作用从而最大限度地降低刀具磨损，应采用更高的超声振动频率以及更小的占空比。

5.1.4.3 超声振动辅助金刚石切削试验

超声振动辅助切削方法中频率、振幅、振动方向以及在超声振动条件下的切削参数、刀具磨损等因素对已加工表面质量都有着重要影响。各国学者对此进行了大量的工艺试验，但他们得到的具体超声振动参数（频率、振幅）、切削参数（切削速度、进给量、切削深度）以及切削条件（刀具材质及几何参数、工件材料及表面轮廓形状、机床性能、切削液）等都不尽相同，其中的加工参数也只能对具体加工提供定性指导。

通过超声振动车削不同材料时的表面粗糙度与切削速度之间的关系，发现其关系曲线具有稳定、回升、失效三个区段，在稳定区内粗糙度数值最小而且稳定。在某一固定切削速度下振幅由小到大增加时，加工表面逐渐平整，粗糙度值逐渐减小，当振幅增大到某一值后粗糙度值基本不变。稳定区的长短与临界切削速度有关，提高临界切削速度可以延长车削速度稳定区。在振动车削适用的范围内，其表面粗糙度对于进给量的变化非常敏感，而对切削深度和刀具几何参数的变化不敏感。

另外，由于受超声振动以及刀具和工件之间相互作用力的影响，名义振幅和振动方向以及名义切削深度等参数实际上都存在微小动态变化。在此情况下，对于一维超声振动切削来说，刀具运动轨迹已经不是严格意义上的直线往复运动了，有时已经接近二维椭圆振动（由变幅杆轴向倾斜振动和变幅杆末端横向振动以及其他因素引起）或其他不规则运动。同时，在实际切削过程中刀具必然会发生或多或少的磨损或崩刃，继而再引起切削力、切削温度、切削深度等因素的变化。这些实际应用中的动态变化因素及其交互作用对表面质量也有较大影响，在表面质量要求很高的情况下，应该采取综合措施进一步减小刀具磨损并确保加工过程的稳定性。

与传统金刚石直接切削相比，超声振动辅助金刚石切削黑色金属使刀具磨损明显减少并提高了工件表面质量。然而，刀具磨损只是在一定程度上减轻了，并非完全得到了抑制，随着切削时间或切削距离的加长，化学磨损和积屑瘤的迹象依然存在。

（1）表面轮廓形状对刀具磨损的影响

当切削平面时，刀具切削刃上参与切削的弧段始终保持不变，尽管超声振动切削方法能有效减小切削力、摩擦力且其分离特性具有一定散热作用并有利于切削液较好地发挥冷却、润滑作用，但切削弧段始终与已加工表面和过渡表面存在较大接触压力，不断的摩擦还会使切削弧段温度上升。当温度积累到一定程度，再加上与具有催化作用的铁接触，使刀具发生化学磨损的温度阈值降低而极有可能诱发化学磨损。

当切削曲面时，由于工件表面存在一定曲率，刀具切削刃上参与切削的弧段始终在发生变化，即变切削刃切削。因此，每个切削弧段所分担的切削时间就会变短，即使当前切削弧段温度较高而在下一时间段已不再参与切削，从而将会使此弧段的切削温度迅速降低。理论上被加工曲面的曲率越大效果越明显。另外，变切削刃超声振动切削方式可以使切削液更容易渗入刀－件界面，进而使切削刃冷却润滑更充分，这样有利于减轻刀具磨损从而延长刀具使用寿命。不好的一面是，由于切削曲面工件时是变切削刃切削，刀具受力的作用点也在不断变化，这样容易引起变幅杆倾斜使工艺系统不稳定。

（2）工件尺寸对刀具磨损的影响

刀尖温度随着切削速度增大而升高，而且扩散系数对切削温度的微小变化非常敏感并随温度升高呈指数增长趋势。因此切削温度升高将会引起刀具扩散磨损，所以切削速度不能太高。当工件被加工直径较小时，采用恒定的较低主轴转速进行加工对工件表面质量和刀具磨损影响不大，但当工件被加工直径较大时，被加工表面外侧的切削速度将会增大数倍，此时对工件表面质量和刀具磨损的影响将会很大。因此，应该综合衡量工件尺寸与主轴转速的影响，使切削速度保持在某一范围内而不致使刀尖温升太高，因此可以采取变转速的方式加工大口径的工件，如图 5－8 所示。

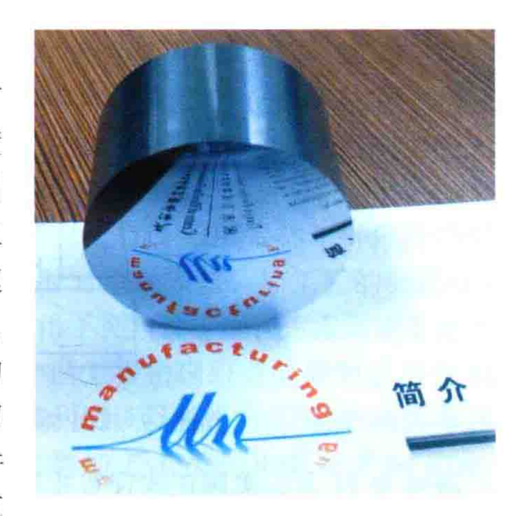


图 5－8　变转速切削凸球的镜面反射效果（工件粗糙度 $Ra4 \sim 25$nm）

5.2　KDP 晶体单点金刚石超精密切削加工

5.2.1　KDP 晶体加工现状

KDP（KH_2PO_4，磷酸二氢钾）晶体是 20 世纪 40 年代发现的一种性能优良的非线性光学材料。由于它同时具有较大的非线性光学系数、较宽的透光波段、较高的激光损伤阈值、优良的光学均匀性和易于生长大尺寸的单晶体等优点，所以 KDP 晶体目前是大型固体激光器和强激光武器等现代高科技领域唯一能被用作激光变频器、电光调制器和光快速开关等元件的光学晶体材料。

KDP 晶体在集上述优良光学性能于一身的同时，又具有质软、脆性高、易潮解和易开裂等一系列不利于光学元件加工的缺点，这使得 KDP 晶体在采用研磨、抛光（如 ELID 磨削、浴法抛光和磁流变抛光等）加工方法时很容易让加工过程中使用的磨料嵌入 KDP 晶体表面，并且很难通过超精密抛光的方法将杂质从晶体表面去除，而这些杂质或缺陷又将严重降低 KDP 晶体的激光损伤阈值。对于大型固体激光器和强激光武器等激光装置来说，这些加工方法带来的致命缺陷显然是无法接受的。针对上述问题，KDP 晶体单点金刚石切削（SPDT）加工技术于 20 世纪 80 年代初开始逐步发展起来，它是一种利用天然单晶金刚石作为刀具、在计算机控制下飞刀铣削加工光学表面的新兴技术，具有以下优点：

①可以有效地保证加工表面与晶轴的精确定向，这对于光学频率变换非常重要；

②几乎没有边缘效应，可保证晶体元件的高精度面形加工质量，特别是对矩形孔径元件；

③可以有效地减轻粗加工阶段在晶体表面形成的亚表面损伤，提高晶体元件的激光破坏阈值。

单点金刚石切削加工 KDP 晶体时，通常采用“飞刀”切削的加工方式。切削加工时，装有金刚石刀具的刀架安放在高速旋转的主轴上，KDP 晶体零件安装在具有真空吸盘的工作台上，工作台作直线进给，高速转动的刀具对工件进行切削，如图 5－9 所示。

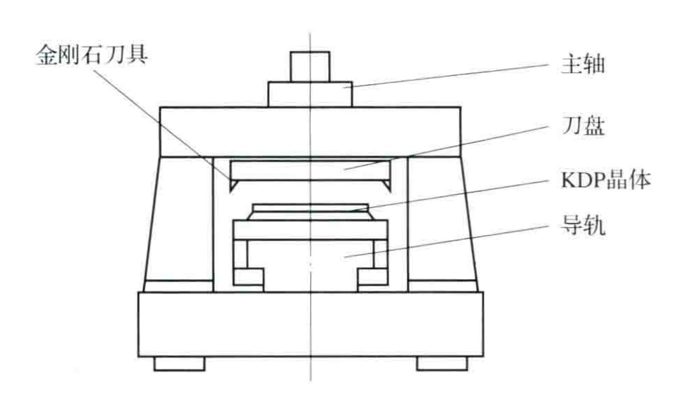
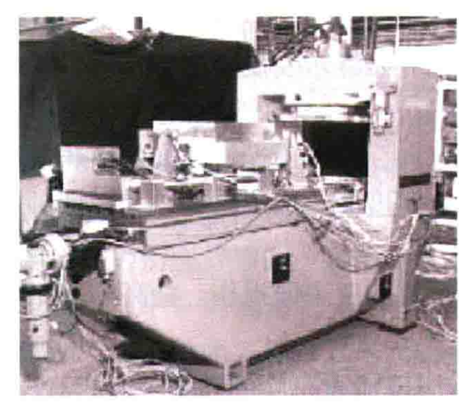


图 5-9 KDP 晶体超精密飞切加工机床结构示意图

1994 年 11 月，美国正式宣布并签发了被称为国家点火装置（NIF）的激光核聚变计划，美国专家一致认为大尺寸、高表面质量的 KDP 晶体元件的切削加工将是研制 NIF 的瓶颈环节。为了降低切削过程中产生的波纹状刀痕所带来小尺度相位调制的不良影响，1986 年美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室（LLNL）在 PNEUMO 超精密机床上对 KDP 晶体进行了 SPDT 试验研究。1997 年 LLNL 实验室研发了 KDP 晶体的专用机床，如图 5-10（a）所示，但用来制造 NIF 中的 KDP 晶体仍然有所不足，其在研制美国国家点火装置时，委托 Nanotechnology System 公司特殊定做了 Nanotech VF 8500S 机床，该机床是大口径 KDP 晶体专用加工机床，能够加工 450mm × 450mm 的 KDP 晶体。俄罗斯超精密机床 MO-600，能够加工直径为 600mm 的 KDP 晶体。

法国于 1998 年提出了“兆焦耳激光器（LMJ）”计划，认为计划方案中共有十大关键问题有待解决，并把大尺寸 KDP 晶体的生长与加工技术放在首位。为研究各种因素对 KDP 晶体超精密切削加工表面粗糙度的影响效果，法国学者于 1999 年在美国 LLNL 采用 SPDT 技术对 KDP 晶体进行了超精密切削加工试验，并利用试验和优化设计的方法优选出了 SPDT 的加工工艺参数。日本在利用超精密磨床对 KDP 晶体进行超精密磨削加工方面的研究比较深入，最终通过加工试验获得了表面粗糙度 *Ra* 为 1.93nm 的超光滑加工表面。但是由于 KDP 晶体材料的软脆性，使得加工过程中的砂轮磨粒极易嵌入到工件表面而严重影响其光学性能。因此，近年来日本对大尺寸 KDP 晶体超精密切削加工的研究也更多地转向 SPDT 技术。



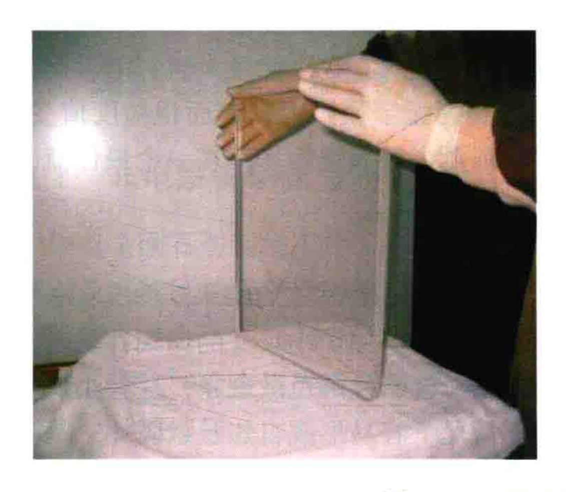
（a）美国LLNL实验室研制



（b）哈尔滨工业大学研制

图 5-10 KDP 晶体超精密飞切加工机床

我国在光学和激光领域投入最大的两个方向是“激光惯性约束核聚变（ICF）”和“强激光武器”，两者都需要数量众多的高精度、大口径光学元件（包括K9光学玻璃、KDP晶体和石英等材料的光学元件），而这些光学元件的超精密切削加工则已成为激光聚变和激光武器进一步发展的最大瓶颈。中国工程物理研究院从俄罗斯进口的MO－6000PL型SPDT超精密机床，采用SPDT超精密切削加工技术对大口径KDP晶体工件进行切削试验研究时获得了表面粗糙度3～8nm的光滑表面。同时对主轴误差、加工后的面形误差、小尺度波纹和表面粗糙度等也进行了详细分析，并取得了突破性进展，重点解决了面形误差和小尺度波纹两大难题。哈尔滨工业大学先后为中国工程物理研究院研制了多台KDP晶体超精密飞切加工设备，如图5－10（b）所示，并利用该设备进行了KDP晶体单点金刚石切削加工的工艺技术研究，利用优选的切削参数加工Ⅰ类、Ⅱ类和Z向KDP晶体，可以直接得到表面粗糙度≤5nm的超光滑加工表面。面形精度达到1.6λ PV（300mm×300mm），KDP晶体加工样件及检测结果如图5－11所示，基本满足了KDP晶体的加工需求。



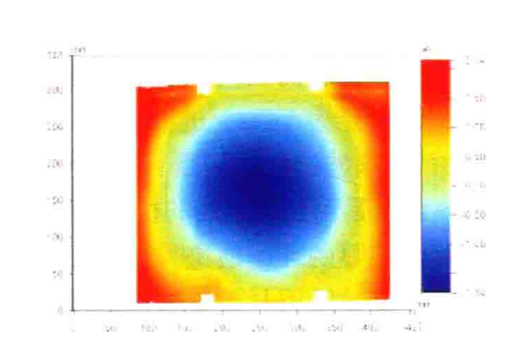


图5－11 KDP晶体飞切加工结果

5.2.2 影响KDP晶体加工表面质量的主要因素

KDP晶体属于脆性材料，其超精密切削加工机理与其他脆性材料的超精密加工机理类似，称为脆性材料的塑性域加工。加工过程中切削层厚度超过某一临界值时，材料开始产生断裂破坏；而当切削层厚度小于该临界值时，材料的去除方式主要是塑性变形方式。要实现塑性域加工的条件除了刀具前角为大负前角和切削厚度必须小于临界切削厚度外，还需要高精度、高动态刚度的静压主轴和静压导轨等条件。

NIF装置中的KDP晶体的3项最难达到的技术指标是：短波长表面粗糙度（$\lambda_{sp}<0.12$mm时其均方根为3.0nm），表面波纹度（$0.12\text{mm}<\lambda_{sp}<33\text{mm}$时其均方根为6.4nm），以及$\lambda_{sp}>33$mm时$5\lambda$（$\lambda=633$nm），实际应用中常用表面粗糙度、表面波纹度和透射波前3项技术指标来衡量。

5.2.2.1 影响表面粗糙度的因素

影响表面粗糙度的主要因素有主轴转速、切削深度、进给深度、刀具前角、进给量、刀具半径、晶体的晶向、刀具磨损、主轴平衡状况等，其中最主要的影响参数为机床主轴

转速、进给量、刀具前角等因素。

(1) 晶体的晶轴方向对表面粗糙度的影响

由于 KDP 晶体的各向异性，加工表面的表面粗糙度对晶轴方向有很大的依赖性。研究结果表明：相对晶轴方向平行地进行切削时，表面粗糙度值小；相对晶轴垂直时，表面粗糙度值变大，所以在 KDP 的精密加工中，切削方向一般要求和晶轴方向平行。

(2) 刀具前角对表面粗糙度的影响

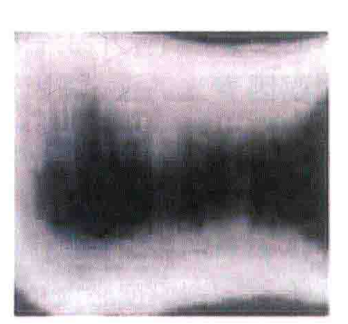
刀具前角对 KDP 晶体的精密加工影响非常大。通过试验表明，随着刀具负前角的增大，表面粗糙度值逐渐变小，当增大到一定角度时，随着负前角继续增大，表面粗糙度值反而变大，所以存在一个最佳刀具前角，而且这个值因刀具圆弧半径不同而不同，一般为 $-30° \sim -45°$。

(3) 刀具圆弧半径和进给量对表面粗糙度的影响

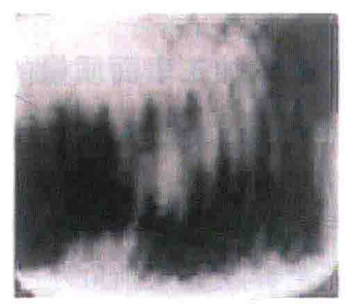
表面粗糙度的理论计算公式为：$R_{PV}=f^2/8R$，R_{PV} 是表面粗糙度的峰谷值，R 是刀具圆弧半径，f 是刀具每转的进给量，可以由进给速度与机床主轴转速之比来计算。从上面的公式可以看出，增大圆弧半径和减小进给量，能够减小表面粗糙度值。上面是理论分析的结果，和实际情况有一定的差距。日本学者试验研究表明：在进给量大时，刀具圆弧半径增大，表面粗糙度值变小；随着进给量变小，刀具圆弧半径增大，表面粗糙度值变大。因而，为了获得表面粗糙度值小的光学表面，刀具圆弧半径和进给量存在一个最佳值，一般来说圆弧半径为 5mm，进给量 1 ~ 2μm/r 为宜。

5.2.2.2 影响波纹度的因素

图 5－12 是用 2 台不同的机床加工的 240mm × 240mm KDP 晶体的结果。图 5－12 (b) 中可以看出明显的加工痕迹，这种刀痕给晶体的透射波前添加了小尺寸的周期性扰动，情况严重时，波纹沿刀具旋转方向形成类似光栅的结构，有明显的色散现象，这种小尺度的相位调制是强激光非线性增长的噪声源，在高功率情况下容易形成自焦丝状破坏，是必须控制的制造误差。



(a) 设备1加工



(b) 设备2加工

图 5－12 KDP 晶体加工结果

加工工件出现的波纹度主要是由机床的原因引起，例如早期 KDP 飞切加工设备中的进给轴采用了气体静压导轨加滚柱丝杠驱动，如果丝杠螺母与机床拖板之间的联轴节设计不合理或安装调试过程中出现问题，而气体静压导轨的阻尼和动态特性又差，加工时工件很容易出现丝杠螺距尺度的波纹度。而采用液体静压导轨和直线电机驱动则很好地解决了上述问题。

5.2.2.3　影响透射波前的因素分析

超精密加工原理有两种，一种是运动复印原理，另外一种是压力复印原理。运动复印原理主是靠机床的精度来保证加工工件的精度，需要高精度的超精密加工机床和较大的投入。压力复印原理利用一般精度的机床和误差均化原理来实现高精度加工。KDP 晶体的加工就是利用运动复印原理，所以零件的加工精度主要由机床的运动精度决定。

透射波前是激光核聚变中光学元件的主要技术指标，是为了满足强激光应用而提出的。它同以前的机械零件面形有很大的区别，同时两者又有紧密的联系。一般来说，工件两面的面形精度高，零件的透射波前就高；如果两面的面形精度低，透射波前不一定就低，这是因为，如果这时两面的面形刚好互补，零件的透射波前就可能很高，而且这种关系是不确定的。所以在设计机床时，可以采用概率分布和统计的原则来确定机床的主要精度指标，同时要求设计人员具有超精密加工和光学加工方面的知识，这样才能更好地理解这些光学技术指标，设计出能满足 KDP 晶体加工用的机床，而且最好是一种专用的机床，这样结构相对简单，从而可以提高机床的精度。

5.3　镍磷合金超精密切削工艺

5.3.1　非电解镍磷合金材料特性

单点金刚石切削加工是一种省时省钱的光学镜面加工方法，特别对于大口径的金属反射镜以及高陡度的金属反射镜，但是这种加工工艺目前也有一定限制，通常只能加工软金属、面心立方金属，如铜合金、铝合金，但是这些金属由于硬度小，表面很容易被划伤影响使用。在这些软金属表面化学镀镍磷合金是一种有效的解决方案，可以被称为作非电解镍磷或化学镀镍磷。

化学镀镍磷工艺是利用镍盐溶液在强还原剂次磷酸盐的作用下，使镍离子还原成镍金属，同时次磷酸盐分解析出磷，从而在具有催化表面的工件上，获得镍磷合金镀层。镍与磷共同沉积形成非晶态镀层。另外，通过调节镀液的配方，可以获得低磷、中磷或高磷的镀层，不同的含磷量导致不同的镀层性质。化学镀镍磷工艺是将镍离子变成镍金属，没有电流施加于被镀零件或溶液，此工艺过程被称为“自身催化”作用，在反应过程中镍是作为一种催化剂。镍的沉积仅仅发生在浸入在溶液中有活性的表面。这种涂覆反应是不稳定的，为了获得高质量的表面过程需要严格控制，包括 PH 值、稳定剂、润湿剂、精细过滤、温度控制等。

化学镀镍磷工艺是 1944 年发明的，并于 1950 年取得专利。化学镀镍磷溶液可以是碱性或酸性的。其中碱性溶液涂覆镍对于金刚石加工反射镜的效果不太令人满意。酸性溶液含有高磷成分，镀层表面比较光亮、残余应力大，易于破裂切削。大部分碱性工艺涂覆镍磷合金会在切削时使金刚石刀刃很快破损，而只有极少数碱性工艺化学镀镍磷合金用金刚石加工可以得到较好的效果，碱性工艺镀镍磷合金的耐腐蚀性低于酸性涂覆工艺。正因为上述原因，金刚石加工一般要避免使用由碱性工艺得到的化学镀镍磷合金。

化学镀镍磷合金中磷的含量一般从 2% ~22%，一般认为 7% ~13% 是最佳含量，此时镀层的力学性能最佳。化学镀镍磷合金镀层的硬度可以通过热处理工艺快速增加，最高

硬度可达到1000维氏硬度。化学镀镍磷合金镀层沉积物是层状结构，会减弱镀层的固有强度，化学镀镍磷合金镀层可能包含镍或镍磷微小颗粒，会脱离基体在表面滚动，在研磨或抛光过程中会划伤表面。充分的热处理可以减小镀层的分层，同样也能使小颗粒分布均匀。随着磷含量的减小，热处理工艺更容易消除镀层的不规则性。

化学镀镍磷合金可以在大多数铝合金、不锈钢、钛合金、塑料等材料表面沉积。通常镀层厚度小于0.13mm，镀层和材料基体之间的结合强度会随着基体材料特性的变化而改变，对于钢基体材料从205MPa到409MPa，大多数金属都能达到这个数值。热处理通常可以提高镀层与含黑色合金的结合强度，但并不是总能提高与其他金属的结合强度。

对于化学镀镍磷合金，具备以下特点：

①硬度高：化学镀镍层的硬度要比电解镍的高得多，电解层的硬度一般在160～180HV，而化学镀镍镀层的硬度一般都在300～600HV(29.8～55HRC)，甚至可以到达700HV，即洛氏硬度60HRC。经过合适的热处理后，其硬度会继续增加。化学镀镍的高硬度对于提高模具的使用寿命是非常有利的。

②镀镍组织形态为微晶或非晶结构，孔隙率少，材料性质均匀，不存在位错、晶界等组织缺陷，非常有利于保证单点金刚石的切削稳定，从而保证型芯的面形精度与表面质量。

③化学稳定性好，耐腐蚀。

④镍磷与基体结合力好，可以防止镀层因周期性应力而导致型芯表面因疲劳失效而剥落，提高模具使用寿命。

⑤化学镀镍可以适用于各种基体，包括金属、半导体与非金属，应用范围十分广泛。

⑥化学镀镍厚度均匀，通过利用还原剂化学还原的方法在工件表面进行沉积，可以克服复杂的几何形状，形成均匀镀层。在对深槽与深空零件时，这一优势尤为明显。

采用化学镀工艺镀镍最重要的特性是可以用金刚石刀具进行单点切削，其表面粗糙度可以达到2.5nm（rms）。而通常采用的电沉积镀镍则不适合单点金刚石切削加工，而且在边缘和拐角处由于尖边效应更容易堆积，在凹槽或孔则不容易沉积。化学镀工艺则在边缘和拐角处不容易堆积，在浸入溶液的各个表面特别均匀，包括孔和内部通道，厚度一致性可以控制在5μm，特别适合用于各类复杂模具的制造。

镍磷合金的超精密切削工艺参数与铜合金、铝合金等有色金属材料相似，这里主要探讨单点金刚石切削加工时刀具的磨损特性以及磷含量对加工质量的影响规律。

5.3.2 镍磷合金超精密切削刀具磨损

金刚石是最硬的物质，但在切削加工镍磷合金时在前后刀面还会产生不同程度的磨损，并随着切削距离的增大磨损加剧。由于刀具磨损不仅影响被加工工件的质量，更重要的是刀具耐用度直接决定了非电解镍金刚石车削工艺的实用性。为此国外许多学者进行了非电解镍单点金刚石车削的工艺试验，研究了金刚石刀具的磨损机理及形式、切削工艺参数的优化等，而目前国内镍磷合金的超精密切削加工工艺还鲜有研究。

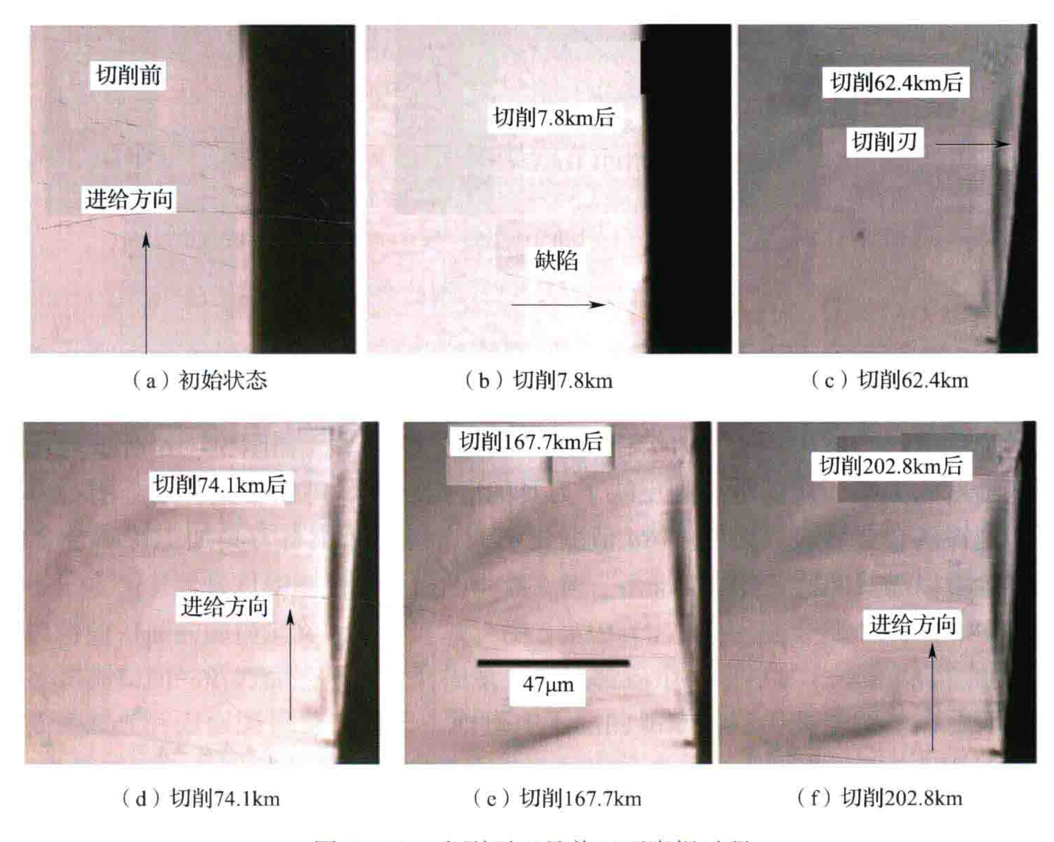
新加坡学者在东芝超精密车床ULG－100上进行了镍磷合金超精密切削试验，金刚石刀具圆弧半径大约2mm，前角0°，后角7°，后刀面为110晶向，如表5－2所示为刀具磨损试验切削条件。

表 5－2　刀具磨损试验的切削条件

项目	试验数据
切削深度/μm	4
进给速度/（μm/r）	10
主轴转速/（r/m）	1000
镍磷合金磷含量/%	9～13

试验所用工件为镀层厚度 100μm 的镍磷合金，基体材料为 STARVAX 模具钢。超精密切削试验过程中刀具从工件外沿切到中心计 1 次（折合每次的切削距离约为 0.78km）。每经过若干次加工后对刀具及加工工件进行观察记录（分别为 1，2，5，10，20，50，以后每切削 15 次观察一次，直到 260 次）。

如图 5－13 所示为随着切削距离的增加刀具前刀面的磨损过程，可以看到切削 7.8km 后前刀面已经开始出现了磨损，而经过 62.4km 切削后前刀面的磨损带更加明显，但这之后直到完成 202km 的切削，前刀面的磨损带不再发生明显的变化。采用 X 射线光谱仪（EDX）对金刚石刀具进行分析，表明前刀面没有明显的物质沉积黏附，前刀面的这种磨损机理和本质还有待进一步研究。



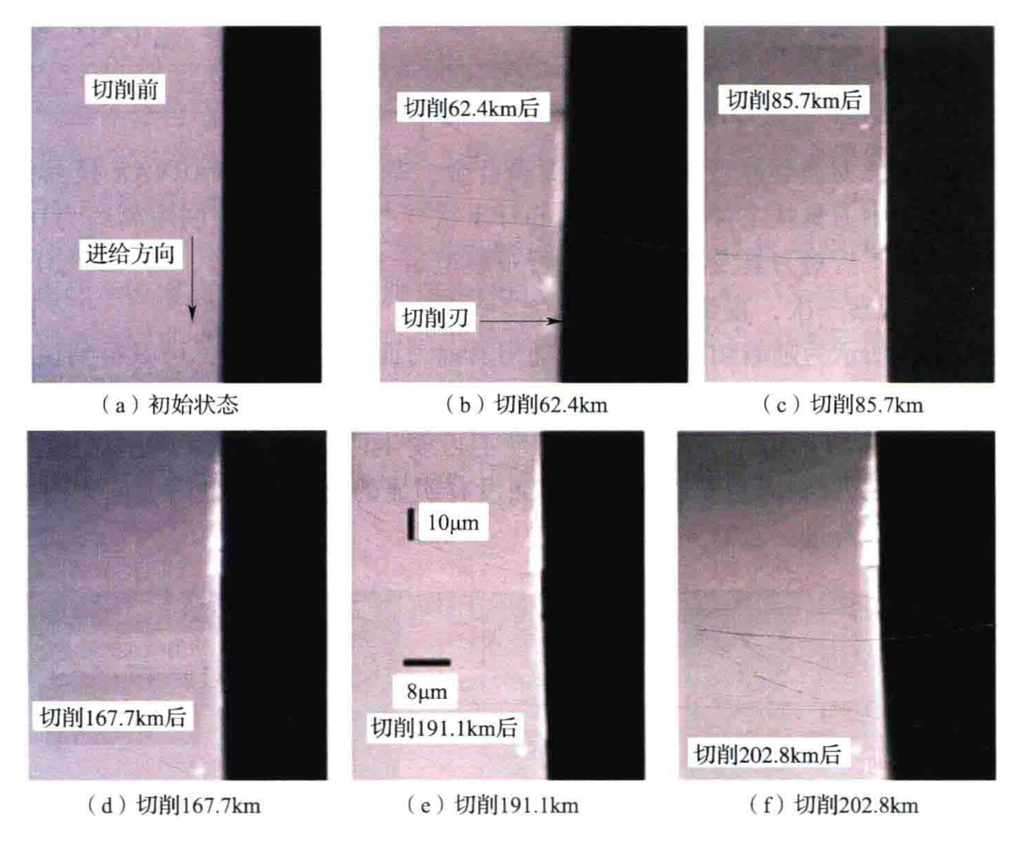
（a）初始状态　（b）切削7.8km　（c）切削62.4km

（d）切削74.1km　（e）切削167.7km　（f）切削202.8km

图 5－13　金刚石刀具前刀面磨损过程

对于金刚石后刀面的观察发现，当切削距离为 62.4km 时出现了磨损，表现为在后刀面贯穿整个切削刃出现了一条亮线（磨损带），并在切削刃的磨损带中可以观察到一些间距为 10μm 的槽，这种磨损可认为是阶梯形式的磨损。在这种模式下，由于切削刃磨损造

成的工件未切除部分将会引起阶梯磨损的加剧。随着切削距离的增加，由于一部分切削刃磨损，未被切除的材料将会被邻近的切削刃切除，这样就产生了第二磨损带。工件的切除宽度很明显与进给量相同，但第一磨损带的切深比第二磨损带要大，随着切削距离的增大，沟痕更加明显，如图 5 - 14 所示为金刚石刀具后刀面的磨损过程。



（a）初始状态　（b）切削62.4km　（c）切削85.7km

（d）切削167.7km　（e）切削191.1km　（f）切削202.8km

图 5 - 14　金刚石刀具后刀面的磨损过程

如图 5 - 15 所示为金刚石刀具后刀面的磨损量与切削距离的关系，当完成 202. 8km 的切削试验后，后刀面磨损量达到了 4μm。工件表面粗糙度取决于许多因素，如刀具磨损状态、工件材料、机床特性、刀刃锋利度以及工艺参数等。如图 5 - 16 所示为切削距离与表面粗糙度的关系，切削距离则反映了刀具的磨损状态。可以看到，用金刚石刀具经过长距离切削镍磷合金后表面粗糙度 *Ra* 值变化不大，说明金刚石刀具加工镍磷合金的刀具耐用度完全可以满足实际使用要求。

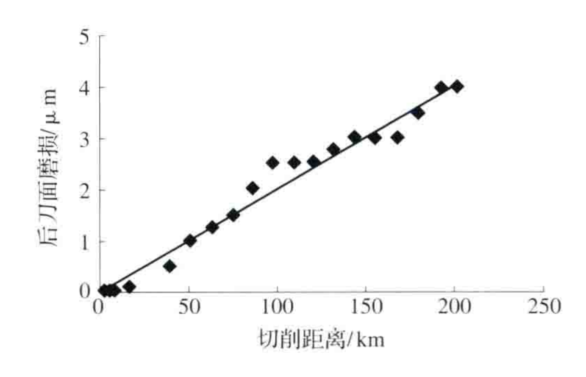


图 5 - 15　切削距离与后刀面磨损关系

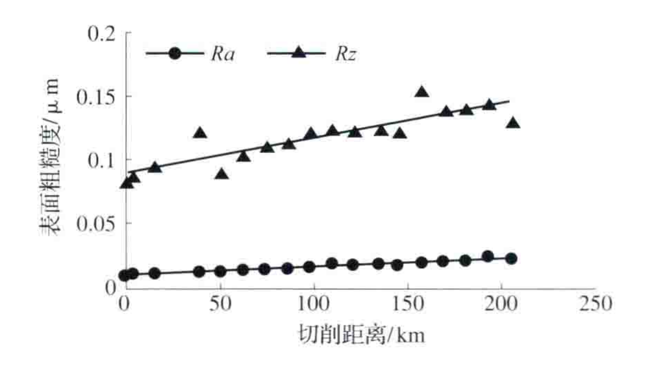


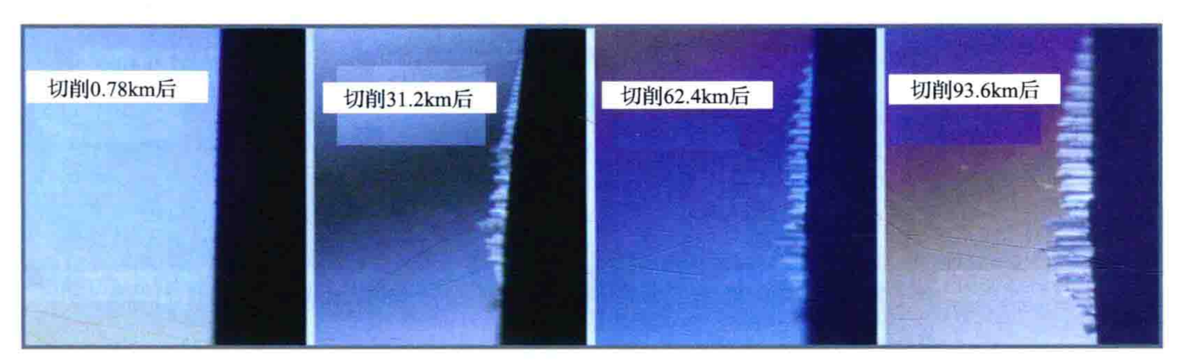
图 5 - 16　切削距离与工件表面粗糙度关系

5.3.3　镍磷合金中磷含量对超精密切削性能的影响

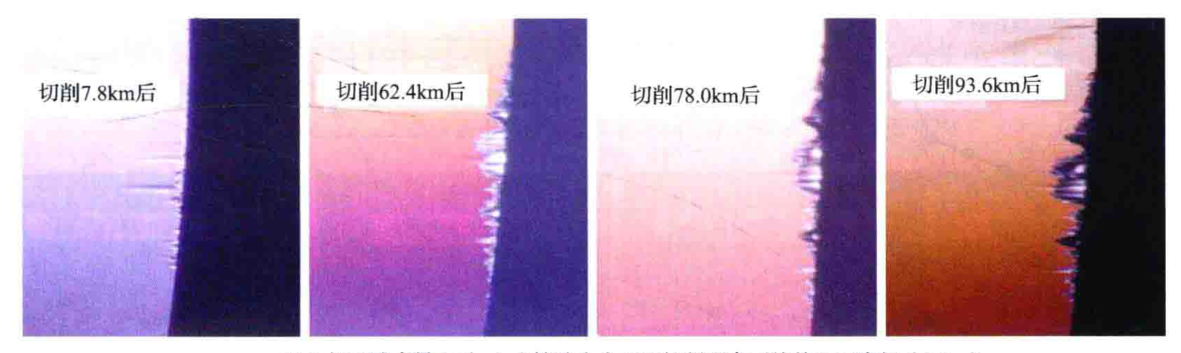
本节所有的试验条件与前节相同，所用镍磷合金材料的磷含量分别为 6% 和 11% 。

5.3.3.1　镍磷合金中磷含量对刀具磨损的影响

图 5 - 17 及图 5 - 18 分别为不同磷含量的镍磷合金材料在进行超精密切削时不同切削距离下的刀具磨损状态。可以看到，6% (w/w) 磷含量镍磷合金加工时前、后刀面磨损相似，但后刀面磨损沟槽更加规则。当切削距离达到 0.78km 时后刀面出现了磨损，而前刀面出现磨损的切削距离为 7.8km；而 11% (w/w) 磷含量镍磷合金当切削距离达到 31.2km 时后刀面才出现磨损，前刀面出现磨损的切削距离为 46.8km，并且前后刀面磨损形式也不同，在后刀面上出现了非常浅的沟槽，而前刀面上切削刃则完好如初。



(a) 加工磷含量6% (w/w) 镍磷合金不同切削距离下的后刀面磨损 (500×)

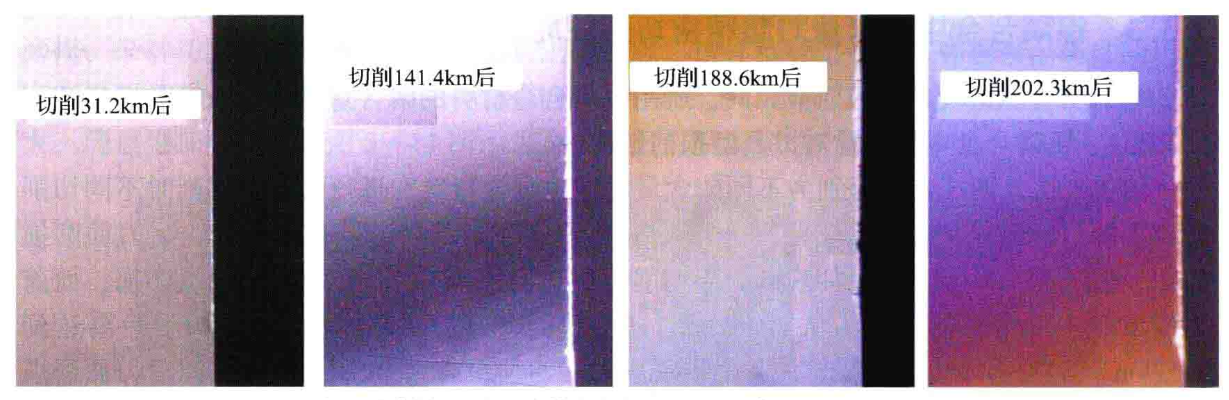


(b) 加工磷含量6% (w/w) 镍磷合金不同切削距离下的前刀面磨损 (500×)

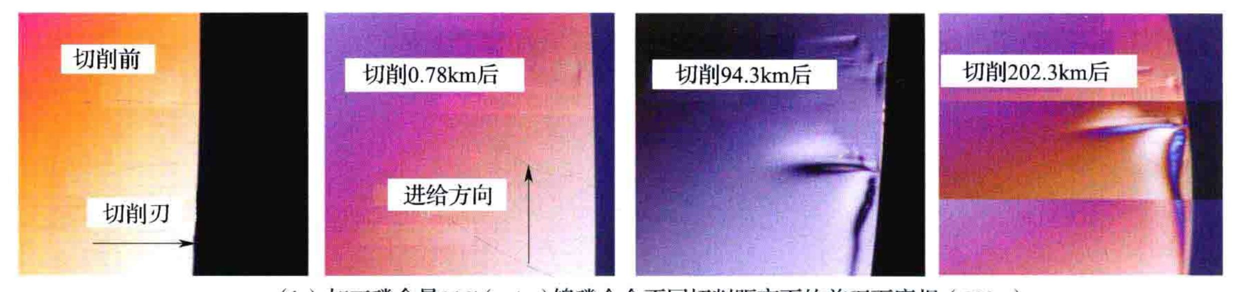
图 5 - 17　磷含量 6% (w/w) 镍磷合金超精密切削刀具磨损

图 5 - 19 为磷含量对切削刀具磨损的影响规律，由于两种含量材料切削时前刀面磨损很小，所以将前刀面的磨损定义为磨损区域。图 5 - 19 (a) 中明显看到 11% (w/w) 含量的材料经过切削初期的后刀面磨损后，磨损量一直比较稳定；而 6% (w/w) 含量的材料随着切削距离的增大后刀面磨损急速增长，而且在不同的切削阶段刀具磨损速率也不同。11% (w/w) 含量材料随着切削距离的增长刀具前刀面磨损速率也不同，如图 5 - 19 (b) 所示。对于 6% (w/w) 磷含量的材料，前刀面的磨损更加明显，并随着切削距离的增长磨损量急剧增加。与后刀面磨损情况类似，前刀面的磨损速率随着切削距离增加其变化也非常明显。

两种磷含量材料的切削试验表明，高磷含量金刚石刀具切削时前、后刀面的磨损量与低磷含量合金材料相比明显小得多。而且 6% (w/w) 磷含量的材料在加工时刀具磨损由于非常严重，切削距离达到 100km 后试验被迫终止。

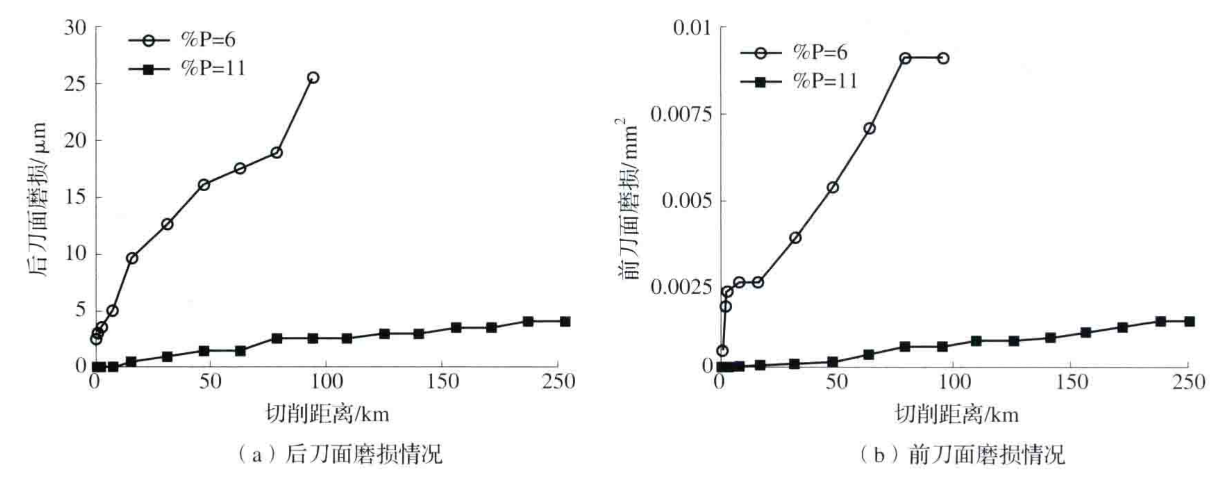


（a）加工磷含量11%（w/w）镍磷合金不同切削距离下的后刀面磨损（500×）



（b）加工磷含量11%（w/w）镍磷合金不同切削距离下的前刀面磨损（500×）

图 5－18　磷含量 11%（w/w）镍磷合金超精密切削刀具磨损



（a）后刀面磨损情况　　（b）前刀面磨损情况

图 5－19　镍磷合金切削时不同磷含量切削距离对刀具磨损的影响

从上述讨论中可知，镍磷合金中磷含量是影响切削刀具性能的重要因素。加工镍磷合金中刀具磨损形式主要包括磨粒磨损、疲劳破损以及石墨化，磷含量越高切削时刀具磨损越小。镍磷合金中磷所起的主要作用如下：有助于加工过程中的润滑、能控制合金材料的硬度和组织。金刚石刀具加工纯镍材料时与加工碳钢类似，铁作为催化剂加剧了金刚石石墨化转换，从而使金刚石刀具急剧磨损。而镍磷合金中磷元素的存在作为润滑剂削弱了金刚石刀具加工镍材料时镍元素起到的催化剂作用，这样在切削高磷含量镍磷合金时切削刀具的化学磨损减弱。

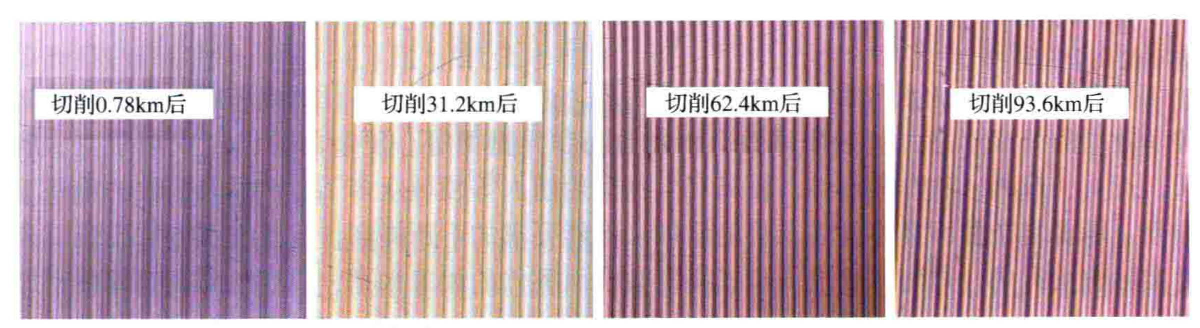
镍磷合金的微观组织是非晶态的，在非晶态材料的超精密加工时，由于被加工材料组

织的混杂使刀具可能会遭遇微冲击，这种微冲击会引起金刚石刀具产生疲劳破坏，经过长距离的切削后最终导致刀具破损。但试验表明这种疲劳破损在加工镍磷合金时基本可以忽略，磨粒磨损是金刚石刀具磨损的主要原因，因此低磷含量镍磷合金材料由于其硬度高导致刀具磨粒磨损严重，影响了刀具的耐用度。

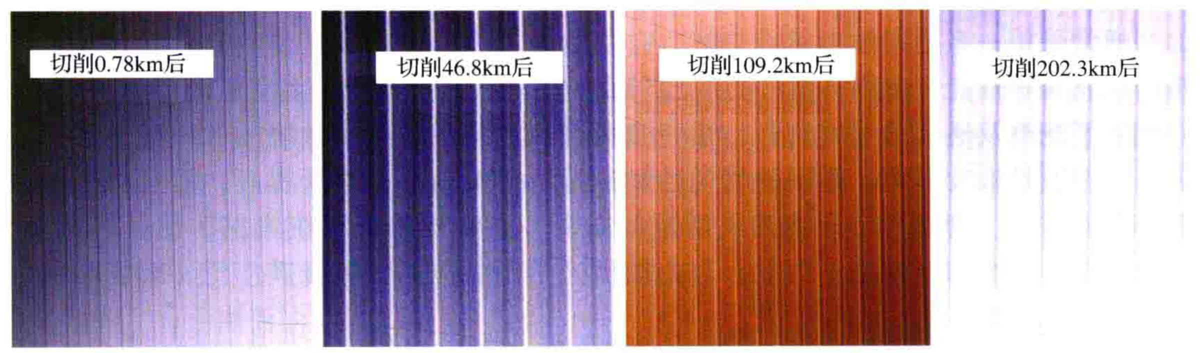
5.3.3.2 磷含量对表面粗糙度的影响

图5-20（a）为6%（w/w）磷含量镍磷合金材料金刚石刀具切削时不同切削距离的工件表面形貌照片，整个试验过程中并没有发生脆性断裂。随着切削距离的增加，被加工表面出现了与进给方向平行的条纹，这些条纹的密度随着切削距离的增加也明显增加，此时在这些条纹中已经很难分辨出进给痕迹。出现这些现象的原因归结于加工过程中后刀面的剧烈磨损，而工件表面条纹正是后刀面磨损后磨损痕迹的复制。

图5-20（b）为11%（w/w）磷含量镍磷合金材料金刚石刀具切削时不同切削距离的工件表面形貌照片。与前面相似，工件表面也产生了平行于进给痕迹的条纹，但是条纹的密度直至试验结束也没有发生太多变化，工件表面质量也要好得多，原因主要归结于刀具后刀面磨损很小。



（a）6%（w/w）磷含量镍磷合金材料在不同切削距离下的加工表面形貌



（a）11%（w/w）磷含量镍磷合金材料在不同切削距离下的加工表面形貌

图5-20 磷含量对加工表面形貌的影响

图5-21表示了随着切削距离的增加，对不同磷含量镍磷合金进行超精密切削加工工件表面粗糙度（*R*a和*Ry*）的变化规律。从中可以看到粗糙度的变化很不规则，粗糙度值最初有明显的增大，但随着切削过程的继续，又开始减小，这种现象是由于新刀具经过一定时间使用后会变得更加光滑从而提高了工件的表面质量。总的来说低磷含量镍磷合金的加工表面粗糙度*Ra*或*Ry*一直大于高磷含量的材料，而且低磷含量材料随着切削距离的增加，无论是*Ra*还是*Ry*值都急剧增加。

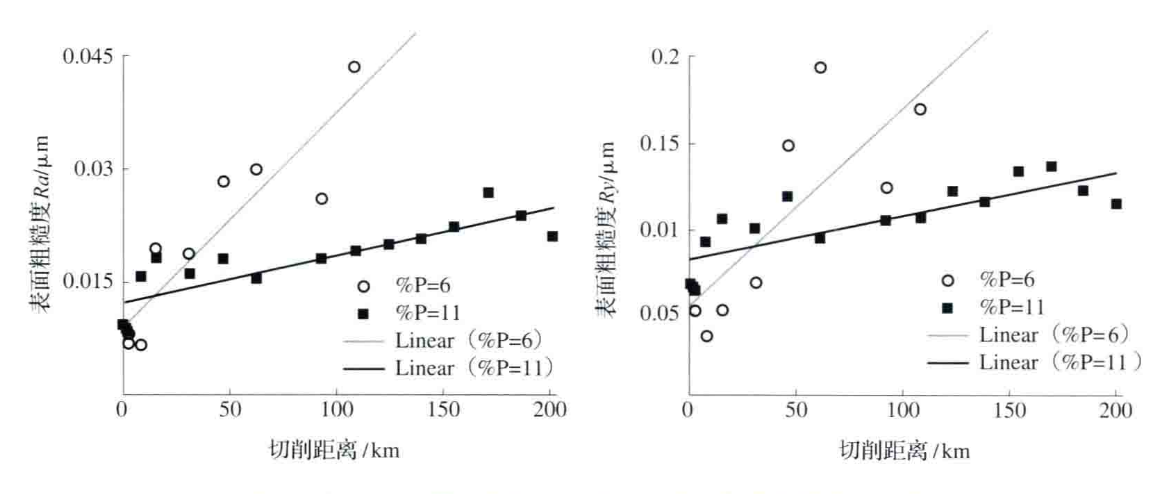


图 5-21　不同磷含量条件下切削距离与表面粗糙度的关系

5.4　光学自由曲面的超精密加工技术

复杂曲面一般是由多曲率的曲面组合而成，达到某些数学特征的高精度，追求功能与美学效果的外观形态，包括非球面、自由曲面和异型面等。复杂曲面已经成为航空、航天、天文、航海、汽车零部件、模具和生物医用植入等领域众多工业产品及零件的重要工作面。随着复杂曲面类零件需求量的增加和性能要求的不断提高，传统加工方法已难以满足实际应用需求，迫切需要进一步提高复杂曲面零件的加工水平，以期达到高效超精密加工。

光学自由曲面是指非对称、不规则、不适合用统一的数学方程式来描述的光学曲面，通常采用一系列离散型值点描述。自由曲面光学元件凭借其传统光学元件无可比拟的优越光学性能，应用日益广泛，已应用于国防、航空航天、太空遥测等重要领域，并成为了光电及通信的关键部件。由于自由曲面的应用，光学系统的像差减小甚至消失，成像质量大大提高；照明的均匀性和能量的传输效率也显著提高；而且由于各种自由曲面透镜、棱镜与反光镜的灵活空间布局，大大压缩了系统光路，使其轻量化，优化了产品的结构与性能。因此，自由曲面光学产品应用领域极其广泛，市场需求急速增长。

光学自由曲面是一类有特殊要求的自由曲面，其主要特点是形状精度和表面粗糙度都必须同时达到很高的要求，例如形状精度通常要求达到与光波长同量级甚至于更高的要求(一般为微米、亚微米级)，表面粗糙度一般为纳米、亚纳米级。

5.4.1　光学自由曲面的应用

在自由曲面光学系统中，透镜以及反射镜也不再是简单的曲面，如抛物面、双曲面、椭球面等，而是由多种曲面构成的高精度自由曲面，自由曲面利用自身曲率的高阶变化将光形进行有目的的、灵活的移动、扭转、变形来形成明暗截止线和所需的光形。目前各领域中典型的光学自由曲面主要包括如下几种：

①离轴非球面：是指如椭球面、双曲面，以及抛物面等回转对称的非球面的一部分；

②环曲面：是由基弧（一段圆弧）绕着与其位于同一个平面，但不通过该基弧中心的直线旋转所得到的曲面；

③Zernike 曲面：是由不同形式的 Zernike 多项式描述并构造的曲面；

④微结构光学曲面：主要是指应用于光学和电子领域中的微透镜阵列、菲涅尔透镜、全息透镜和微型 V 槽上的微结构曲面；

⑤样条曲面：是指由非均匀有理 B 样条、弗格森参数三次曲线，以及 Bezier 曲线等样条曲线按照张量积曲面形式得到的曲面；

⑥双对称曲面：是指关于正交子午线对称，且在这两条子午线上存在曲面曲率半径的最大值和最小值的曲面，例如双二次曲面、复曲面等。

自从 20 世纪 90 年代以来，随着 IT 及数码行业的发展，数码相机、手机的照相镜头，硬盘、光盘等各类读写头都逐步采用自由曲面类零件，其应用领域广阔，市场需求增长较快。自由曲面光学元件目前已成为光电及通信产品的关键零部件，如 V 形槽列阵、微镜列阵和 F－theta 透镜等是几种具有代表性的光学自由曲面。彩色显像管、液晶显示器、数码相机、传真机、扫描仪、激光雕刻机、光电显示器、光纤通信等光电产品和光通信产品已形成了一个数以万亿计的全球市场，而下一代产品中将会大量采用自由曲面照明、成像系统。民用市场广阔的应用促进了自由曲面光学元件的超精密加工和检测技术的发展。

5.4.1.1　典型民用产品

(1）激光打印机和扫描机的 F－theta 透镜

自由曲面 F－theta 透镜主要应用在激光扫描系统中，它被广泛用在激光打标机、激光打印机、扫描仪、传真机、印刷机，以及集成电路印刷设备等与图形发生有关的扫描设备中。

在设计分辨率要求比较低的工业激光扫描系统，譬如激光打标机时，为了加工透镜的方便，大部分的 F－theta 透镜是设计成轴对称式的。但是，由于轴对称式的 F－theta 透镜体积比较大，实际上在激光线性扫描的时候应用到的透镜面积只有很小的一个窄条，而且对称式设计的 F－theta 透镜在考虑控制畸变量的时候往往以牺牲一部分像散为代价，像散校正得不好会导致聚焦的光斑不圆和分辨率的降低，所以在设计精密的扫描系统的 F－theta 透镜时，如激光打印机、扫描仪、传真机等，为了节省空间和提高分辨率较为广泛地应用了自由曲面的形式。



图 5－22　激光打印机中的自由曲面 F－theta 透镜

(2) 汽车前照明反光镜和LED二次光学元件

前照明灯是汽车照明中要求最高、结构最复杂、设计和制造难度最大的车灯。既要照亮车前方的路面，又要照亮马路边的行人和护栏及交通标志，而且不能给对面车辆的司机带来炫光。在汽车前照方面，和传统的抛物面反射镜加配光透镜的组合相比，采用自由曲面反射镜可以同时实现会聚和配光的功能，这样一来前照灯的灯罩就可以设计成符合审美要求的不具任何配光功能的保形灯罩，车灯的形状和汽车流线型的形状融为了一体，整体变得非常美观。自由曲面的设计使得前照灯变得更加灵活性和紧凑。

在汽车LED照明应用中，为了更有效地利用LED的光能以及使LED的光能按特定的角度分布，设计二次光学元件对LED进行重新配光。汽车照明中（信号灯、刹车灯）经常见到的类似于菲涅尔透镜的LED二次光学元件，由折射和全反射组成，充分有效地利用了LED发出的光能。

(3) 液晶显示屏背光板

液晶显示屏背光板的作用是将侧面放置的LED点光源变成背光板整个面上均匀分布的面光源，关系到整个背光源的效率、均匀度和亮度，如果背光板的效率高，则可以少用或不用增亮膜，有效地降低背光源成本。

当背光板上下两面没有任何微结构特征的时候，亮度集中在一侧；当在背光板底面加微透镜阵列时，靠近LED光源附近稍有亮光，因此需要加一层扩散膜和双层增亮膜才能满足要求；当背光板底面加微透镜阵列，而上表面为轮廓渐变V形槽结构的自由曲面时，由于自由曲面的设计采用了边界光线原理，靠近LED处的亮斑基本消除，整个背光板范围内亮度和均匀性大大提高，已能满足要求，如图5-23所示。另外由于背光板上表面的V形槽结构，增加了光线在导光板内循环的次数，提高了光能的有效利用率。



图5-23　轮廓渐变的自由曲面V形槽背光板

5.4.1.2　军事应用

由于对空气动力学、隐身、特定视场或景深等性能要求，以及大型高能激光武器和太空探测等技术发展需求，离轴、非回转对称等自由曲面类零件在现代武器装备系统中得到了越来越广泛的应用，例如各种可见光瞄准器、微光夜视器、红外探测设备、精确打击运载工具和末制导智能炸药等。

在航空领域中，新一代超声速巡航隐形战机、无人机自由曲面光电探测窗口、新型战机平显、头盔显示瞄准光学系统、新一代光电双模制导中远程空射导弹等复杂异型光学整流罩等都大量应用了光学自由曲面类零件；在航天领域中有红外多目标光谱仪、太空探测中自适应系统；兵器领域中有扩展视野深度观瞄系统；轻量化夜视设备等。

(1) 三次相位片（Cubicphase Plate）

利用三次相位片可通过光学变形和数字恢复技术数字化地捕捉图像，从而可以达到增加景深等目的，同时也可以降低对光学设计的要求，如图5-24所示。三次相位片主要应用于军用夜视红外成像系统，可以增加长波红外成像系统的景深。美国陆军夜视实验室、

摩尔公司、日本松下工厂自动化公司等合作进行了三次相位片的设计、加工及检测技术研究。该项目成功地演示了作为红外夜视成像系统的关键元件——硫化锌材料三次相位片自由曲面的加工工艺。加工后的曲面轮廓与公式理论值误差在 ±0. 20μm 之内，该结果相对于 8 ~ 12μm 红外波长范围而言只有 ±λ/50。

(2) 保形光学导引头罩及光窗

保形光学是为飞行器窗口服务的科学，它的主要军事用途包括同轴（导弹红外导引头）和离轴（飞行器前视、下视窗）高陡度非球面两种形式：各种导弹的红外导引头、可见光（电视）导引头；战斗机、武装直升机、无人机瞄准窗或观察窗等，如图 5 - 25 及图 5 - 26 所示。

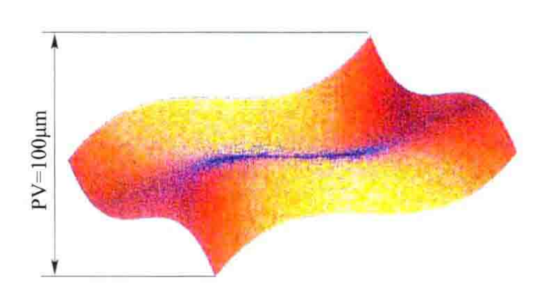


图 5 - 24　三次相位片数学模型

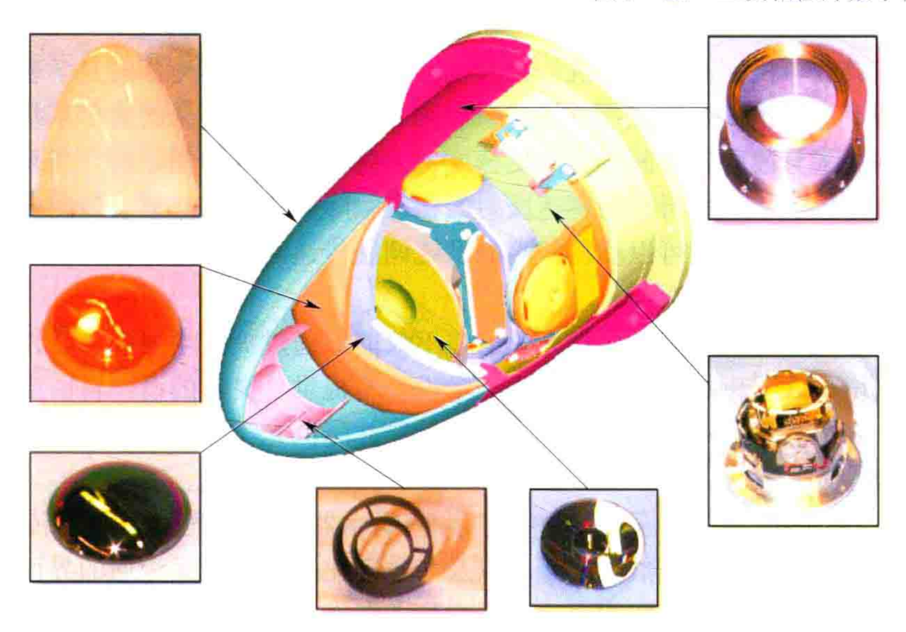


图 5 - 25　世界上第一个保形光学导引头

保形光学导引头罩由于空气阻力小，从而减小了因空气阻力引发的热量，缩短了敌方预警时间，提高了导弹的生存能力，对于诸如巡航导弹之类的亚声速导弹、空空导弹等来讲，使用保形光学元件可以减小其雷达反射面积，增大视场，也利于控制导弹周围的流场。

就红外型空空导弹的发展来说，由于采用红外成像导引头、小气动力面低阻外形、大推力无（少）烟固体火箭发动机和推力矢量控制技术，以及各种抗干扰技术，其射程、速度、精度、离轴发射、全向攻击能力显著提高。保形光学系统的采用有助于其提高机动性、增大视场角、减少反射面，对弹的整体性能提升有显著贡献。保形光学导引头罩的主要缺点是像差增大并随着离轴观测角（弹轴线观测角为零）的变化而变化。当转架离开弹轴线，头罩的光学对称性被打破，所产生的像差是波长的 10 到 100 倍，必须进行像差补偿。

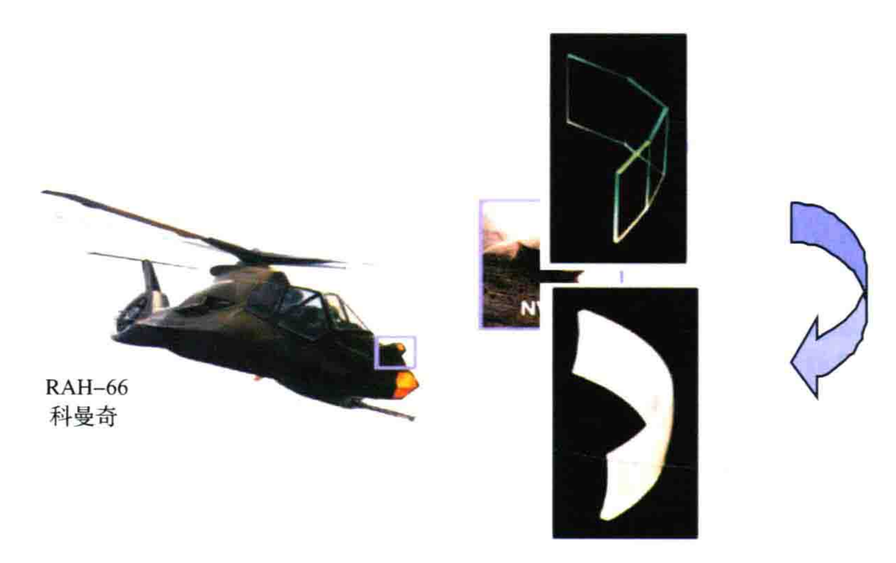


图 5-26 美军“科曼奇”武装直升机夜视仪的分段光学表面和保形光学窗口

此外，现有战斗机、武装直升机、无人机瞄准窗或观察窗多为分段光学表面，它存在以下缺陷：增大了雷达反射面积；降低了系统的光学衍射效率，从而使得系统的调制传递函数减小；增大了分段面各平面接缝的热梯度；接缝处引起了射频散射。当采用保形光学窗口封装光电传感器后，飞行器的雷达反射面积大幅降低；当将保形窗口的内表面或成像透镜作为优化设计参数时，可以获得很高的系统调制传递函数；同时，分段光学表面存在的最后两个固有缺陷也不复存在。

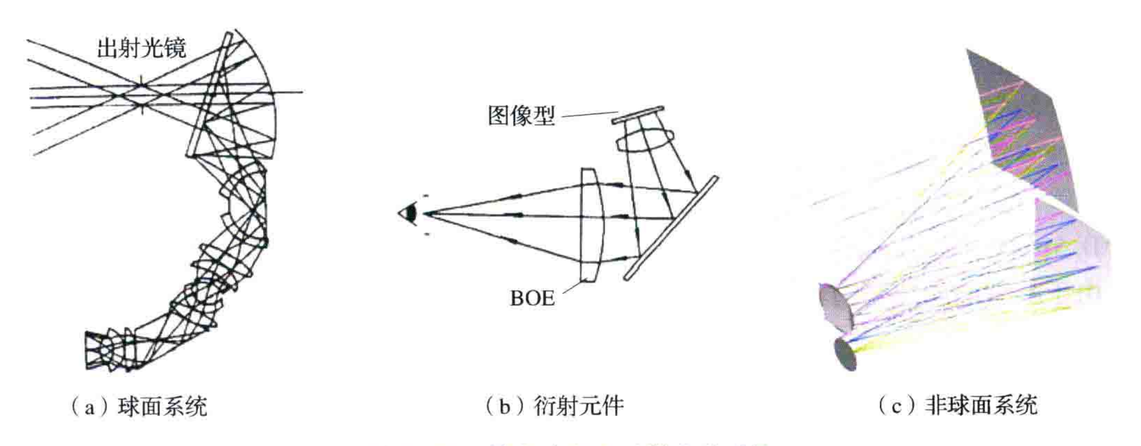
高陡度保形光学导引头罩、保形光学窗口不仅能够通过提高空气动力学性能和降低雷达反射面积来增加武器作战效能，还将为光学设计者提供更灵活的设计自由度，进一步提高成像系统、瞄准系统、火力控制系统的光学性能并降低光学系统重量。

（3）头盔显示器棱镜

头盔显示器系统安装在士兵的头盔上，头盔显示器内安装光学系统与传感器显示装置，是士兵与其他子系统实现信息交互，以及与数字化战场的士兵沟通的界面。通过头盔显示器，士兵能够提高战场感知能力，可观看到上级发出的图解数据、电子地图、战场动态图像、目标探测的距离，并可显示采集图片，进行单兵定位与导航，进行电子地图处理、态势处理与标注、卫星定位与导航，接收显示火控分系统的图像并进行截图、查看、发送图片，并可进行战场文书操作、图文发送报告及路径回放等。

头盔显示系统作为士兵使用的主要信息界面，头盔显示器应为士兵提供尽可能大的视场、更清晰的图像，更大的倍率。在为士兵提供更加舒适与大的信息量的同时，它的重量应尽可能的小，具有良好的人机功效，提高士兵佩戴的舒适性，减少头前部过重对颈部的压迫，保持士兵长时间佩戴的作战能力。

传统的头盔显示器，主要有以下三种方式。第一种采用透镜与棱镜方式，这种设计方式，为了更好地消除像差及获得更大的倍率，必须使用大量的球面镜片，且显示亮度低（见图5-27（a））；第二种采用衍射元件，但人机功效较差，系统亮度也不高（见图5-27（b））；第三种采用多片非球面镜，能够一定量地减少镜片数量，但其结构仍然无法实质性的降低系统重量（见图5-27（c））。这几类设计的头盔显示共同的缺点是视场倍率难以增加，体积和重量均较大，士兵佩戴非常不舒服，且零件过多，可靠性降低。



（a）球面系统　　（b）衍射元件　　（c）非球面系统

图 5－27　传统头盔显示器光学系统

自由曲面光学零件作为一种新型的高技术零件，国外已经广泛开展研究，并已经成功应用于头盔显示器中，只通过一片自由曲面镜片即可构成一个光学系统，较传统的球面镜、非球面镜等具有更多的优点，如图 5－28 所示：

①自由曲面具备更高的设计自由度，应用自由曲面能够大大提高系统的成像质量。

②自由曲面的使用使系统结构更为简化，对减轻系统重量具有重要贡献。

③在同等体积限制下，自由曲面镜能够获得更大的清晰视场。

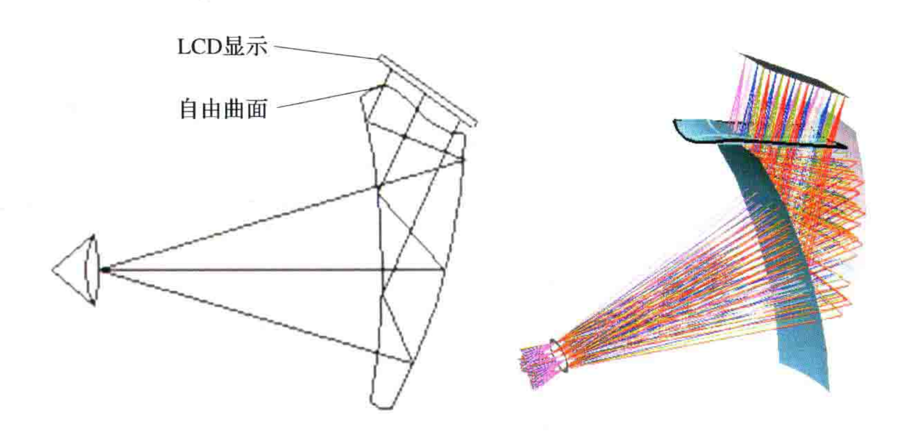


图 5－28　头盔显示器自由曲面棱镜

5.4.2　光学自由曲面超精密加工技术

光学自由曲面零件要大规模的应用，需要接触复制成形技术。利用模具成形技术，即根据所要求的光学自由曲面的形状和结构，设计并制造相应的模具，进而通过复制成形加工出所需的元件。该方法主要包括：光学玻璃的模压成形、光学塑料的浇注成形、注射成形，以及热压成形等。在 20 世纪 70 年代之前，采用该技术可以为研磨、抛光的零件提供毛坯或者制造一些精度要求较低的光学元件。到 20 世纪 80 年代后，采用该技术可以直接制成所需的光学自由曲面元件。复制成形技术的优点在于，其重复精度好、成本适中，适合大批量生产以及中低精度的光学自由曲面元件的生产。但是，利用该方法加工的曲面成形精度与模具自身的精度密切相关，加工品种单一，而且该方法又将制造光学自由曲面的困难转移到了制造模具上，同时需要提高模具的精度。

5.4.2.1 光学自由曲面的超精密车削

复杂曲面的超精密切削是超精密加工技术研究领域的新方向，为了获得光滑面加工变质层较少的高精度复杂曲面零件，通常采用具有纳米量级切削刃钝圆半径的金刚石刀具微量切削的方法。美国II-VI红外光学公司利用 Precitech Freeform705G 超精密车床加工了双锥透镜、光束积分镜、离轴抛物面反射镜、光学阵列等复杂曲面元件，面形精度 PV 值低于 0.5μm，表面粗糙度 Ra 值可达 0.6nm。

由于复杂曲面曲率的多变性，加大了其超精密切削的难度，需要结合控制走刀路径来实现表面的高质量。国际标准化组织将非均匀有理B样条曲面（Non-uniform rational B-splines，NURBS）作为定义产品几何形状的唯一数学描述方法，并成为加工路径设计与曲面造形技术的重要基础。德国亚琛大学研究基于 NURBS 参数曲线的插补，经过参数变量影射及空间轨迹映射，形成拟合后的 NURBS 参数，通过等弓高误差法或弦长法离散，形成刀具运行路径程序控制的 FTS 加工，实现加工后的复杂曲面和理想设计一致的超精密车削。

为达到复杂曲面工件的高精度面形，避免工件因进行不同加工工序而出现安装、定位等造成的加工误差，研究人员将粗、精切削工具同时安装在车床主轴上，利用旋转刀具车削（Rotating tools turning，RTT）光学自由型曲面棱镜，如图5-29所示。研究表明刀具旋转半径及误差是影响面精度的主要因素，工件面形误差随着旋转角度误差而改变，大约每度可使面形误差变化 9.3nm，可加工出所示高精度复杂曲面。此外，为使切削工具易于适应复杂曲面工件面形，出现了自回转刀具车削（Self-Propelled Rotary Tool Turning，SPRTT）和主动驱动回转刀具车削（Actively Driven Rotary Tool Turning，ADRTT）用于航空用难加工材料（如 Ti6Al4V、Inconel 625 等）的超精密加工，获得较好的光滑表面，但仍存在复杂曲面加工中控制高精度面形的难度、表面损伤及工具的磨损等问题。





图5-29 多光学自由曲面棱镜的超精密切削加工

复杂曲面超精密飞刀铣削（Raster Milling，RM）可直接加工并获得亚微米级形状精度的自由曲面（如图5-29），但这需要正确选用刀具轨迹规划条件和加工策略。由于缺乏合适的数控仿真软件，实际加工时必须进行试切，造成加工效率低（成本增加），并容易发生“撞刀”等安全事故，使得光学自由曲面刀具轨迹生成软件成为 F-theta 透镜、汽车用反射镜等自由曲面超精密切削的关键。

飞切加工也称为飞刀铣削，是类似用一个刀片作为刀具的单点铣削加工，即金刚石刀具安装在高速回转的主轴径向方向，同时主轴沿着进给方向间歇性地进行扫描运动，工件

随着工作台运动，实现不同方向的进给，其原理图如图5-30所示。飞切加工有轨迹法和仿形法两种方式。采用轨迹法时，刀具刀尖的最终运动轨迹即为被加工曲面的形状，曲面形状的复杂程度，决定了刀具的几何结构和其轨迹的复杂程度，所以通常需要在精密多轴联动机床上进行加工，对机床有很高要求。仿形法只能用于微结构加工，与传统意义上的仿形加工相似，加工时金刚石刀具的几何形状由被加工的微结构决定，与轨迹法相比，该方法要求刀具有更高的精度，但刀具轨迹简单，对机床性能要求低。

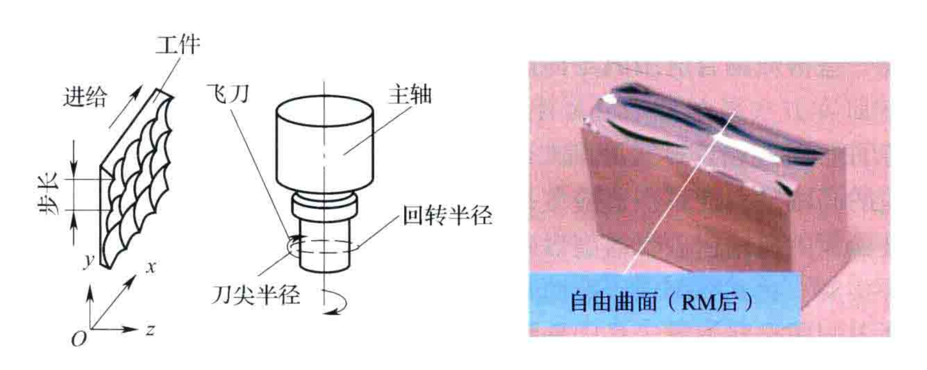


图5-30 飞刀铣削加工原理及所加工后的自由曲面零件

为了获得精度为亚微米级，表面粗糙度为纳米级的光学表面，则要求刀具的回转轴相对于工件曲面的扫描移动速度很低，而且由于刀具就只有一个刀片，刀具每一转只有部分时间参与切削，因此飞切加工时间非常长，例如前面所说的F-theta透镜模具需要加工20h。飞切加工时间过长会导致如下问题：

①存在较多不确定的风险因素，从而导致加工缺陷；

②环境状态的漂移会使得形状精度和表面粗糙度值加大；

③由于加工时间长，增加了加工成本；

④飞切加工还受刀具摆动直径的限制。

因此，面形精度更高、表面粗糙度更低的超光滑复杂曲面的加工，促使纳米级微细高性能刀具制造及其运行轨迹控制成为复杂曲面超精密切削的重要研究方向。

此外，快刀伺服加工工艺、慢拖板伺服加工工艺等也是光学自由曲面新颖的超精密车削工艺，相关内容参见第4章。

5.4.2.2 光学自由曲面的超精密磨削

由于超精密切削实现硬脆材料复杂曲面的高效高表面质量加工的难度较大，超精密磨削也被应用于复杂曲面超精密加工，包括砂轮磨削和砂带磨削，其中光学自由曲面一般用超精密砂轮磨削工艺，而砂带磨削一般用于叶片等复杂曲面的精密磨削。

(1) 复杂曲面的超精密砂轮磨削

由磨粒、结合剂与气孔等制备成的砂轮是广泛使用的磨削工具，其中，固结磨料砂轮容易产生磨削热而损伤失效；电镀砂轮因电镀层过厚而造成砂轮堵塞。为了进行复杂曲面超精密磨削，砂轮必须具有高刚度，需要不断进行修整以保持磨粒的锐利，并防止磨屑堵塞，保证工件表面均匀性。因此，砂轮修整与制备成为影响复杂曲面超精密磨削的关键因素。

日本理化研究所大森整博士研发出金属结合剂类超硬磨料修整磨削技术（Electrolytic

In process Dressing，ELID），可有效修锐砂轮并保证磨削所需磨粒的突出高度，先后历经杯形砂轮 ELID、间歇砂轮修整 ELID－II、无附加电极 ELID－III、带喷嘴 ELID－IV、砂轮与工件表面同步氧化 ELID－V 等类型的发展，有效地实现超精密镜面磨削。ELID 磨削还广泛应用于模压光学透镜 WC、SiC、Si_3N_4 等曲面模具超精密加工中，如利用数控 ELID 磨削系统加工非球曲面模芯 GCr15 轴承钢，获得了面形精度 PV 值小于 5μm，表面粗糙度 *Ra* 为 36nm 的镜面。

虽然复杂曲面的超精密磨削，可以加工出高面形精度的光滑镜面，但是加工表面亚表面损伤大，在一些特殊场合应用的零件需要进一步的抛光加工，以达到去除表面损伤的目的。

（2）复杂曲面的超精密砂带磨削

由于砂轮的高刚度，使其在适应复杂曲面面形（尤其是大陡度面形）时表现出一定的劣势。复杂曲面的超精密砂带磨削以砂带作为磨具，依工件形状和加工要求使高速运转的砂带与工件接触，达到磨削或研磨抛光的加工工艺。砂带是用黏结剂将磨粒黏结在纸、布等挠性基体上制成带状工具，是一种特殊形态的多刀多刃切削工具，具有磨削、研磨和抛光等多重作用，属于弹性磨削，可以加工出具有表面无裂纹、表面粗糙度低等优点的自由曲面和异型面。国外早已将砂带磨削用于超精密加工，面形精度已达微米级，表面粗糙度 *R*a 达到 8nm；而普通国产机床切深微进给精度较低，导致砂带磨削精度仅有 10～20μm。由于弹性变形造成磨削深度难以微量控制，使得砂带磨具不易适应工件复杂曲面形状及随机变形误差，因此，有必要开发复杂曲面的超精密砂带磨削装备以满足生产需求。目前国内汽轮机、航空发动机等叶片类复杂曲面零件的精密超精密加工大都采用砂带磨削。

5.4.2.3 光学自由曲面的超精密抛光

经过车削、磨削等成形加工方式的复杂曲面零件，其表面易残留有车痕、磨痕等表面损伤以及裂纹、残余应力等亚表面损伤，需要通过超精密抛光技术进行去除。此外一些特殊材料的光学自由曲面的最终工序也要求必须是超精密抛光。根据加工机理，目前的复杂曲面超精密抛光技术主要包括复杂曲面零件的计算机控制表面成形技术、抛光工具变形可控的复杂曲面加工技术、抛光工具的“研抛模”柔度变化可控的复杂曲面加工技术、复杂曲面的离子束与等离子体加工、复杂曲面的复合或组合加工等。这部分参见本书第 4 章超精密加工新工艺。

5.4.2.4 各种加工工艺的比较

复杂曲面超精密切削以点单金刚石切削（SPDT）为代表，依靠纳米级微细刀具、高刚度与高精度的机床为支撑，由于较高的材料去除率使加工效率明显提高，可获得很高精度表面质量。基于 NURBS 曲线的插补实现刀具路径控制的 FTS 加工，将进一步提高曲面加工面形精度。复杂曲面超精密磨削必须要有高性能砂轮，虽然 ELID 磨削利用电解特性对砂轮在线修锐，但由于电解液、切削液、磨削液的存在，对环境影响很大；砂带磨削具有柔性砂带与曲面吻合较好、加工成本较低等优点，但难以控制工具抛光路径，导致加工复杂曲面面形精度相对较差。这类复杂曲面超精密成形加工，依靠刀具或磨粒的机械去除作用实现工件材料的去除，不可避免地产生亚表面损伤层，从而限制了所能获得的表面质量。

CCOS、SLP、BTP、MRF、MAF、FJP 等超精密曲面抛光方式，由于微细磨粒的机械作用使得工件表层材料的塑性去除，但工件表面会残留抛光颗粒等残余杂质，导致微小的亚表面损伤。CCOS、SLP 的加工工具与工件表面为刚性接触，磨粒尺寸对加工精度和效率影响很大，侵入表面的硬质大颗粒磨粒可导致工件报废，在降低加工精度和加工效率的同时会使得生产成本的大幅上升。MAF、MRF、MRAFF（磁流变磨粒流动抛光）虽然降低了对硬质大颗粒的敏感度，但存在着磁性磨粒制备过程复杂（MR 液稳定性问题）、加工成本高等缺点，一定程度上限制了其发展和应用。随着复杂曲面工件亚表面质量和完整性要求的提高，这类加工方法的工件表面精度误差演变理论与控制尚需进一步研究。

IBF、PJM 和 PCVM 通过原子能结合、离子溅射及化学腐蚀等方式实现材料去除，可达到极高的加工面形精度和表面质量，一般作为终加工工序，通过去除前道工序留下的亚表面损伤，实现无损伤的复杂曲面超精密抛光。其不存在因抛光工具在工件边缘处去除函数不完整而导致的边缘效应问题，还可对边缘效应进行修正，但因加工设备要求严格而导致加工成本较高。PJM、PCVM 的反应气体和生成物都含有大量剧毒的氟化物，一旦处理不当对环境影响巨大。这类方法在光学复杂曲面加工中，去除函数宽度、加工残差等对整个加工工艺及工件最终性能的影响将是后期研究的重点。

以 EMAF 为代表的基于磁力研磨技术的复合加工，ELID 磨削和 MAF 或 EEM 等组合的加工工艺，以及 MJP、MRAFF 和 UMCP（超声波磁流变复合抛光）等基于磁流变技术的复合抛光技术，由于兼具各自优点，可获得较高的面形精度和表面质量。复合工艺存在着多种加工参数优化选择与控制策略难度以及加工成本高等缺点，但对发展复杂曲面超精密抛光新技术具有重要意义。

表 5－3　自由曲面典型超精密加工工艺比较

加工方法	加工效率	加工面形精度 PV 值/μm	表面粗糙度 Ra/nm	亚表面损伤	环境友好性	加工成本
SPDT	高	0.25	0.6	有	中	较低
CCOS	低	0.04	<5.0	有	中	中
SLP	中	<1.00	<10.0	有	良	高
BTP	中	0.19	0.64	有	良	较高
MRF	中	0.30	0.50	有	优	高
FJP	较低	0.06	1.0	有	优	中
IBF	较低	<0.01	<0.5	无	优	高
PJM	中	<0.02	<1.0	无	中	高
PCVM	较高	<0.13	0.6	无	中	高
MJP	中	0.014	2.0	有	良	中

注：SPDT—点单金刚石切削；CCOS—小磨头抛光；SLP—应力盘抛光；BTP—气囊抛光；MRF—磁流变抛光；FJP—射流抛光；IBF—离子束抛光；PJM—等离子体喷射加工；PCVM—等离子体化学蒸发加工；MJP—磁射流抛光技术。

5.4.3　光学自由曲面的超精密检测技术简介

自由曲面是复杂的、不规则的非回转型曲面，很难采用统一的数学方程式描述，因此

光学曲面的加工和检测难度较大。目前自由曲面的面形测量还没有完善的方法，曲面的匹配和拟合，加工面形和设计面形的比较都有问题，目前仍无确定的国际标准来评估自由曲面的面形精度。目前市场上的商业产品，如 Vecco、Taylor Hobson 等公司产品只可分析非球面的面形精度；对于任意自由曲面，上述公司生产的 Wyko、Talysuf PGI 等系列产品虽可获得测量面形的原始数据，但对自由曲面面形精度的分析，目前尚无成熟的技术和方法。Taylor Hobson 公司的软件 Talymap 目前通过拟合来去除形状从而获得面形误差，但受到测量数据误差的影响，不可能真正实现自由曲面亚微米面形误差的评定，同时缺乏稳健性。日本松下公司宣称可评定部分自由曲面面形误差，但其可行性及标准性仍待确定，其技术仍处于保密状态。

光学自由曲面的加工一般可以分为铣削、研磨、抛光三个阶段。第一步，根据面形的数学描述将工件铣削到与理想面形微米量级的偏差；第二步，用计算机数控技术研磨到亚微米量级；第三步，将自由曲面面形抛光到 PV 值优于 $1/10\lambda$（$\lambda = 632.8$nm）。

上面三个加工阶段都是由计算机控制执行的，各个阶段的检测与加工过程是密不可分的，只是各个阶段根据要求精度的不同，可以分别采用不同的检测手段。一般来讲，第一个阶段和最后一个阶段分别采用三坐标测量机和光学干涉仪，第二个阶段一般采用轮廓仪进行面形的检测。进行光学自由曲面面形检测的流程图如图 5-31 所示。其中第三个阶段可以采用子孔径拼接技术或计算全息技术（CGH），并借助干涉仪进行检测。

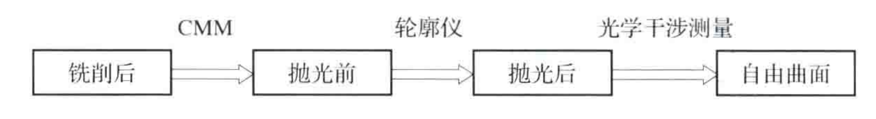


图 5-31　光学自由曲面面形检测流程图

（1）基准面和测量面之间的匹配

由于光学自由曲面没有一个明确的基准面，因此能否实现自由曲面的基准面和测量面之间的最佳匹配问题是自由曲面检测的关键。自由曲面的最佳匹配曲面形状误差评定可以分为已知设计模型和未知设计模型（赋值曲面）两种情况，二者略有不同。当设计模型已知时，将测量面与设计面经过一定的坐标变换达到最佳匹配，选择适当的评定参数即可实现形状评估。当设计模型未知时，则需要首先对测量离散点以一定的拟合或插值算法进行曲面重构，采用自基准的方法，构造合适的参考面进行评定。二者都是在基准面与测量面最佳匹配的情况下实现曲面评定的。

日本学者提出了最佳匹配曲面形状误差评定方法，通过使实测曲面与理论曲面的特征点、特征线、特征面的完全重合，使实测曲面与理论曲面达到“最佳匹配状态”，从而消除大部分因测量基准与设计基准不重合而产生的系统误差，但该方法计算复杂且困难。1997 年有学者提出参数曲面形状误差计算的迭代逼近方法，较之于最佳匹配方法，其计算的相对误差大大减小，但其实现过程仍较复杂。

为了更易精确地进行迭代，提出了五点预定位法，该方法使测量面与基准面在小偏差范围内逼近，即使测量面与设计曲面在空间上保持大致相同的位置与姿态，从而便于借助于优化迭代实现二者的精确匹配。

（2）自由曲面测量评定算法

光学自由曲面基本可分为连续自由曲面和结构型自由曲面，对于连续自由曲面，主要

有综合自由曲面误差评定、稳健自由曲面误差评定以及参考点协助自由曲面评定等算法。其中稳健自由曲面评定方法针对测量数据中的异常点进行处理，消除异常点值对评定结果的影响。对于一些曲面特征不明显的自由曲面，采用加入参考点的方法进行曲面的精确匹配。

①综合自由曲面误差评定算法原理：采用预定位、精调整的分布多级，逐步优化的曲面匹配算法，对测量曲面和设计模型进行曲面匹配。预定位采用五点初定位，保证了精调整时的初始位置，避免陷入曲面局部最优匹配。在初调整过程中，采用最小二乘和最小区域的双重优化目标对测量曲面和设计模型进行曲面匹配，继而对测量的自由曲面进行误差评估。

②稳健自由曲面误差评定算法原理：稳健自由曲面评定算法主要用来处理含有异常点数据的自由曲面评定。首先利用最小二乘进行测量曲面与设计模型的匹配与调整，从而获得偏差。根据 3σ（标准方差）判定条件，当某点的偏差大于 3σ，同时，其频谱密度小于某阈值，则认为该点为异常点，继而定位异常点。然后对定位的异常值点进行邻域均化或者去除的处理。处理好异常值点的曲面继续进行曲面匹配，如此循环。当根据判定条件不再发现有异常值点时，稳健曲面调整结束，最后进行曲面误差评定。

③参考点协助自由曲面测量算法原理：当曲面特征信息不明显，如一些平缓的曲面，局部测量曲面到设计整体曲面的匹配就比较困难。针对这种情况，开发出参考点协助自由曲面评定方法。参考点关联于工件表面，并一次装夹完成加工过程，从而使得参考数据点与工件表面具有确定的相对位置关系。随后在同一坐标框架下进行表面数据测量。当工件表面数据与参考点数据在同一坐标框架下测量完毕，首先进行参考点识别，然后进行参考点与设计值进行匹配，获得刚体变化矩阵，同时对工件表面数据进行匹配，从而实现了快速自由曲面匹配过程。考虑到加工误差使得参考点数据及与工件表面相对位置存在误差，当完成曲面快速匹配之后，再采用最小二乘或最小区域进行曲面的进一步优化匹配。

对于结构型曲面如微透镜阵列面的综合评定，可采用网格错位参数、结构特征分布参数等，使得对微结构曲面的评定从单个结构曲面扩展到整体的评定，从而实现了对微结构曲面的全面评定。首先通过 Wyko 或 Talysurf 等轮廓测量设备进行曲面表面数据测量，进行单个结构曲面和结构面阵列表面数据测量；对于单个结构曲面的评定包括表面粗糙度、形状精度以及尺寸特征等的评定；对于结构面阵列的整体评定，首先进行噪声去除等数据预处理，接着进行模式识别获得结构阵列的模式，然后进行一系列的网格参数计算，例如间距误差、错位角度误差、轮廓特征参数以及其他错位参数等。

（3）光学自由曲面测量方法

经过抛光之后的光学自由曲面对于测量的超高精度要求以及在检测过程中必须兼顾测量精度和测量范围之间的矛盾，使得传统的接触式测量已经无法实现。虽然长程面形仪（Long Trace Profiler，LTP）和夏克－哈特曼传感器（Shack－Hartmann Sensor，SHS）一起可以达到一个很高的测量精度，但却损失一些重要的信息，如中频位相误差。利用干涉仪并借助于专门设计的补偿器，可以解决这一问题，但是对于大偏离量的待检测非球面，无论是零位补偿器的设计、检测，还是装调都会引入误差，正像哈勃天文望远镜（HST）的制作误差恰恰是因为补偿器的装调误差造成的。而对于那些非规则、非旋转对称的光学自由曲面，则根本无法通过传统的零位补偿器进行补偿。

基于上述难题，人们将子孔径拼接技术应用于光学自由曲面的检测，其他一些方法，如计算全息（CGH）和反射光栅摄影法也都具有很好的应用前景，并逐渐被越来越多的人们所青睐。

①子孔径拼接技术（SAT）

子孔径拼接的思想最早是由詹姆斯·怀恩特（JamesWyant）等人在1981年检测大的平面镜时提出的。利用子孔径拼接技术，可以拓展干涉仪测试的横向和纵向动态范围，使干涉仪测量光学元件的口径和相对孔径都有很大的提高，同时可大大提高测量的空间分辨率并降低成本。

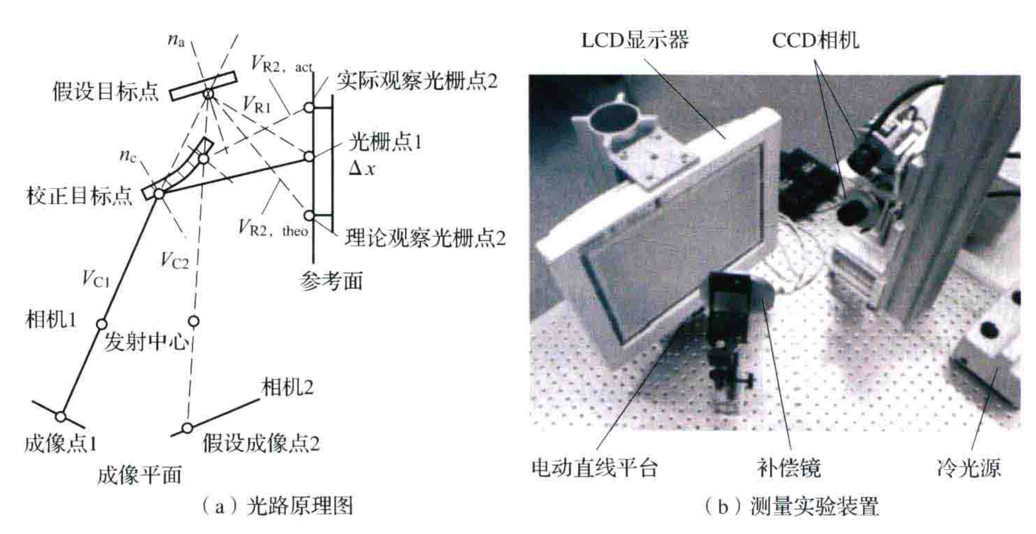
子孔径拼接的关键技术在于子孔径划分、子孔径波面数据的采集和子孔径拟合拼接的数据处理方法。拼接测量面临的主要问题是拼接测量过程中的误差累积，如何消除拼接误差，尤其对非球面拼接测量的误差修正，是干涉拼接测量的技术关键。

子孔径轴向平移和倾斜会极大地降低测量的精确度，因此必须对该误差进行有效评估并消除这种偏差。在离散位相法（Discrete Phase Method，DPM）中，波前不是由泽尼克多项式来表示，而是通过测量子孔径上大量的离散点得到的位相数据来描述的。这种方法子孔径有重叠的区域，倾斜和轴向的平移可以根据子孔径上各个离散点由最小二乘法来计算。DPM可以说具有里程碑式的深刻影响，在此基础上后来发展了一种名为多孔径重叠扫描技术（Multi - aperture Overlap - scanning Technique，MAOST）的实际测量技术。而1997年布雷（Bray）制造出了子孔径拼接干涉仪，从此子孔径检测技术逐渐成熟起来。

②反射光栅摄影测量法

德国布伦瑞克大学提出了反射光栅摄影测量法（Reflection GratingPhoto - grammetry，RGP），虽然目前的精度不是很高，但是具有良好的发展前景。该方法不受被检面几何面形的限制，可以用于检测各种形状的光学自由曲面。

该测量系统由作为成像系统的两台CCD相机和产生参考结构的LCD显示器组成，如图5-32所示。两个成像系统在两个不同的方位分别观察被测镜面，在每一个视野里，都可以看到一个参考结构的虚拟像。通过利用相机的对极几何和反射镜面遵循的反射定律去寻找这两组数据集之间的联系，即可以计算出被检面的每一点的坐标值，达到检测的目的。



（a）光路原理图　　（b）测量实验装置

图5-32　反射光栅摄影测量法

如图 5－32（a），由于针孔投影，物点必须处于像点 1 和相机 1 的投影中心决定的直线上（V_{C1}）。从像点 1 处观察的光栅点 1 的坐标可以由已知结构特性的参考结构的记录数据决定。V_{C1} 上物点位置的初始值可以定义为它的任意一点的坐标。现在假定的物点和光栅点 1 定义一条直线 V_{R1}，考虑到待检面上入射角等于反射角，可以计算出相应的法线向量 n_a。

然后分析相机 2 中的数据，从假定的物点到相机 2 的像面画一条线，可以从假定的像点 2 观察物点的估计坐标值。从像点的信息，参考结构上相应点的信息可以被算出来，那就是实际记录在像点 2 上的光栅点。最后，从法线向量 n_a 和第二个相机的观察向量 V_{C2}，可以计算理论反射光线向量 $V_{R2,\text{thero}}$。反射光线和参考平面的交点确定了理论上能在像点 2 观察的光栅点。

设实际观察光栅点和理论观察光栅点之间的距离为 Δx，它是物点初始坐标评价值的一个标准。如果假定的物点与实际的物点相一致，则这两个光栅点之间的距离达到最小值 0。因此，通过根据距离 Δx 的大小，可以通过迭代算法求出待检面上每一个物点的三维坐标值。

③计算全息技术（CGH）

超微细加工技术的不断发展，为计算全息图的制作提供了强有力的技术保障。当前计算全息的理论已经非常成熟，由于计算全息可以产生我们想要得到的任意形状的波前，所以用 CGH 作为零位补偿器来检测光学自由曲面具有很大的优势和很好的前景。

计算全息图的制作工艺大致有两种，即激光直写（Laser Writer）和电子束刻写（E－beam Writer）。利用计算全息图作为零位补偿器去检测光学自由曲面，只需要根据已经很成熟的计算全息的基本理论进行抽样和编码，并且检测系统的装调也比较简单。和前两种检测方法相比，省去了复杂的迭代算法，检测结果一目了然。这里以一个波前编码系统的相位板的检测为例介绍一下 CGH 在光学自由曲面检测中的应用。

利用刻制在玻璃基底上的 CGH 作为零位补偿器来检测三次位相板，检测原理图如图 5－33 所示。由 CGH 的衍射 1 级光产生标准的待检非球面波前，垂直照射到待检的非球面上，由非球面反射的波前再次经计算全息图衍射后，衍射 1 级光形成检测波，与干涉仪自身的参考光波相干涉形成干涉条纹，并由成像物镜成像到 CCD 探测器上。

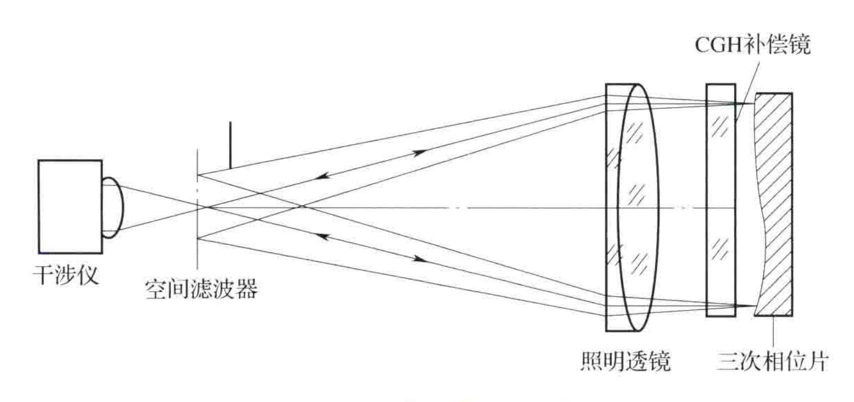


图 5－33　检测原理示意图

把 CGH 零位补偿器、准直照明系统、待检测的自由曲面组成一个光学系统，CGH 选取衍射 1 级（或－1 级）。利用 CGH 检测自由曲面的一个重要的问题是衍射级次的分离。

需要在 CGH 的位相方程中引入一定数量的倾斜，使得需要的 +1 级衍射光与其他级次的衍射光波分离开来，并用空间滤波器滤掉不需要的级次。

利用计算全息理论上可以检测任意面型的光学自由曲面，但是当被检面的斜率过大时，作为零位补偿器的 CGH 的刻线会很密，从而导致补偿器加工的误差增大，测量精度随之下降。

第6章　微结构特征的超精密加工技术

随着科技的发展，微结构表面在光学领域、机械电子领域、生物医学领域和军事领域都显示出越来越重要的应用价值和广阔的应用前景。微结构功能表面的高精度、高效率、低成本加工制造引起了世界各国广泛的关注与研究。单点金刚石切削加工技术可以在没有后期抛光的情况下直接加工出具有纳米级表面质量和亚微米级面形精度的微结构表面。尤其对于线性槽微结构、微槽结构阵列、重复性的棱柱矩阵、金字塔矩阵等非回转对称微结构特征和应用于特殊反射表面涂层、薄片和磁带的微结构的加工，单点金刚石切削都起着极其重要的作用。

6.1　微结构功能表面的概念及应用

6.1.1　概述

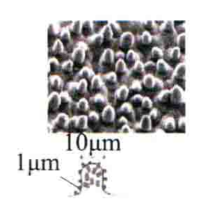
自然界中的动植物为了在恶劣的环境下生存，经过几十亿年的进化，实现了自身结构、材料与功能上的优化统一，其中某些生物表面所展示出来的特殊性能引起人们的极大兴趣，如荷叶表面的超疏水性能、蝴蝶翅膀的结构色以及鲨鱼等大型生物能在水中快速游动等。随着微纳测量测试技术的进步，人们能够发现生物表面具有特别的微纳米结构，这些表面结构是获得生物特殊性能的主要原因。

对荷叶表面进行微观观察，发现其表面是很多微小的乳突（10μm 左右），每个突起上还有更加微小的颗粒（小于1μm），如图6－1（a）所示，这种微米结构与纳米结构相结合的结构，称为微纳复合阶层结构，这种结构是产生超疏水和自清洁效应的根本原因。水稻叶表面也有类似结构，与荷叶不同的是，其表面乳突沿平行于叶边缘的方向呈一维有序排列，而在垂直方向上则是任意排列，在这两个方向上水滴更易于在沿平行叶边缘的方向流动，这种各向异性的滚动行为是由三相接触线的各向异性所决定的。在不改变表面自由能的条件下，可以通过调控微米乳突的排列方式设计具有二维各向异性浸润性的表面，使得水滴在这样的表面上沿着不同的方向具有不同的滚动能力。对鲨鱼表面的鳞的观察表明，其表面上有精细间隔的鳞脊，如图6－1（b）所示，鳞脊的排列基本上与流动方向平行，鲨鱼皮上的鳞脊可以使边界层稳定，减小快速游动阻力。

受到自然界生物特征的启发，人类在日常生活中有意识地应用了上述微结构，如图6－2（b）所示，在耕地的犁表面增加了一些小的凸点，可以使泥更容易从犁表面脱离，从而减小耕地时的阻力。国际泳衣品牌 Speedo 公司生产的泳衣在编织过程中控制了表面的编织纹理及形状，如图6－2（a）所示，获得了3%～5%的水下减阻效果，使运动员的成绩有了大幅度的提高，这种泳衣俗称鲨鱼皮泳衣，结果使国际泳联不得不禁止比赛中使用这种高科技的产品。同样利用表面微结构特征，可设计出具有方向依赖性的超疏水材

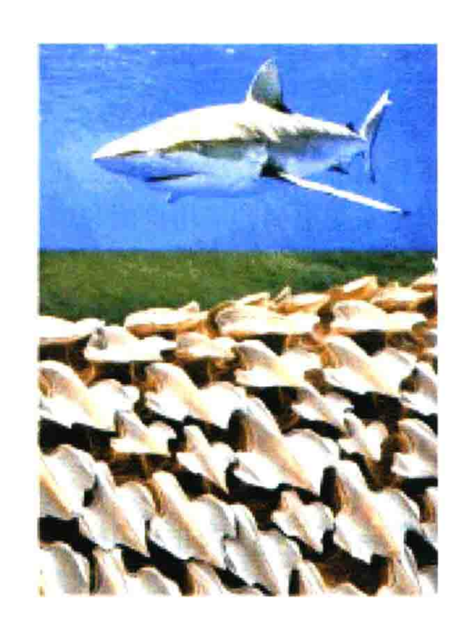
料，能够应用于输油或输水管道从而提高管输量。研究生物表面的微纳米结构，并在人工材料表面制备出仿生物表面微纳结构，实现生物表面的某些特殊功能，必将是仿生新材料、新结构发展永恒的主题。







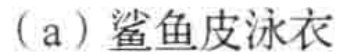
（a）荷叶的宏观及微观结构



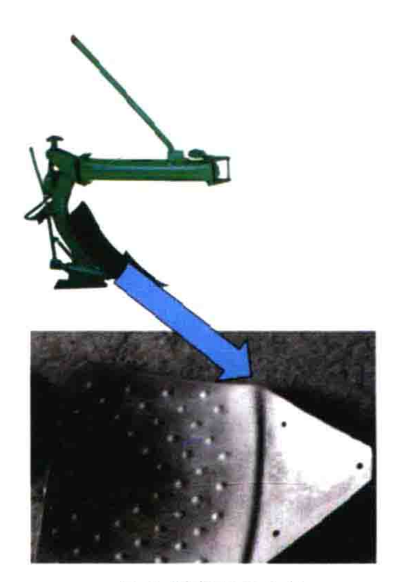
（b）鲨鱼表面的微观结构

图 6-1　荷叶及鲨鱼皮表面的微结构特征





（a）鲨鱼皮泳衣



（b）犁表面的凸点

图 6-2　微结构特征的仿生学应用

物体表面具有一些特定形状的微结构特征从而使该物体具有了一些特定的功能，这种具有一定功能的微结构表面我们称为微结构功能表面。微结构功能表面具有特定的拓扑形状，结构尺寸一般为 10～100μm，面形精度小于 0.1μm，其表面微结构具有纹理结构规则、高深宽比、几何特性确定等特点，如凹槽阵列、微透镜阵列、金字塔阵列结构等，这

些表面微结构使得元件具有某些特定的功能，可以传递材料的物理、化学性能等，如黏附性、摩擦性、润滑性、耐磨损性，或者具备特定的光学性能等。

在航空、航天飞行器宏观表面加工出微纳结构形成功能性表面，不仅可以减小飞行器的风阻、摩阻，减小摩擦，还可以避免结冰层形成，提高空气动力学和热力学功能，从而达到增速、增程、降噪等目的，同时表面特定的微结构特征还能起到隐身功能，增强突防能力，如图 6－3 所示。微结构功能表面还在民用光学系统、显示设备、聚光光伏产业、交通标志标牌、照明等领域被广泛应用，市场需求量巨大。



图 6－3　微结构功能表面在飞行器上的应用

6.1.2　微结构功能表面的应用

6.1.2.1　微结构功能的超疏水特性

（1）超疏水结构基本原理

在一个平整的固体表面，水滴自然铺展，达到固－液－气三相平衡时，在三相交界处沿液、气界面做切线，此切线和固、液界面的夹角我们称为接触角 θ，如图 6－4 所示。当接触角小于 90°为亲水性表面，接触角大于 90°为疏水性表面，接触角大于 150°则称为超疏水表面。

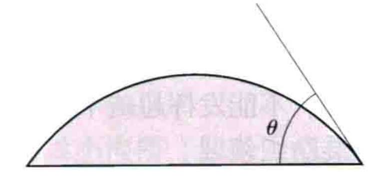


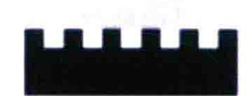
图 6－4　水滴的接触角定义

对于理想平整的表面，其接触角由固－液－气三相的界面张力即表面能决定。而对于粗糙的表面，物体表面粗糙度对液体接触角的

影响目前主要有两种模型解释，即 Wenzel 模型和 Cassie 模型。其中 Wenzel 模型中，假设在粗糙表面上液体充满所接触的沟槽（见图6－5（a）），一般称之为润湿接触；Cassie 模型则假设液体在固体表面形成一种复合表面，液体并不充满沟槽，液体和固体间存在小气泡（见图6－5（b）），一般称之为复合接触表面。



（a）液滴充满粗糙表面的沟槽



（b）液滴在粗糙结构顶部形成复合结构表面

图6－5　Wenzel 模型和 Cassie 模型原理图

由于粗糙表面的存在，使得实际上固液相的接触面要大于表观几何上观察到的面积，从而对物体疏水性产生了增强的作用。表面几何结构可以导致液滴从 Wenzel 润湿接触向 Cassie 复合接触转变，即固液从完全接触转变为表面气液固三相接触，这主要是表面接触线的阻碍和表面的不均一导致的。随着表面粗糙度的增大，表面孔隙率增大，液滴与固体表面不再紧密接触，而是存在气体，形成一种气固液复合表面。

根据上述原理，目前形成超疏水表面主要有两种方法：一是在粗糙表面修饰低表面能物质，即在物体表面涂覆疏水涂料；另一种是直接在物体表面加工微结构或者利用疏水材料制成带有微结构的粗糙表面薄膜用于需要的物体表面。

（2）超疏水结构的应用

①飞行器的防除冰

当飞机在结冰气象条件下飞行时，某些部位的迎风表面就会因大气中的水滴撞击、积聚而结冰。大量的事故和研究都表明，飞机关键部位的结冰，会导致飞机的升力下降、飞行阻力增大，从而引起飞机的操纵性和稳定性等气动品质的恶化。尤其是航空发动机在地面和空中一定的温湿度下，进气口整流罩和支板易出现结冰。由于结冰将导致进气流场畸变，使发动机性能恶化，冰脱落还可能导致发动机叶片断裂，甚至造成机毁人亡的重大事故。根据空气流场的计算和仿真以及实际结果表明，通常只是在飞机的某些特定部位易于结冰，如图6－6所示。

针对飞机的不同部位，目前常用的防除冰方法除了主动除冰（电热防/除冰等）措施外，还广泛采用在飞机易结冰部位涂装低表面能疏水涂层的方法来起到被动防除冰的作用。这种方法相对前述几种方法具有成本低、耗能小、实现难度低等特点，是一种很重要的飞机表面防除冰辅助手段。目前飞机上采用的疏水涂层，其中含有有机硅和有机氟等低表面能材料，虽然表面也形成了一些凸凹的粗糙结构，但由于涂层的表面微观结构形状、精度和分布等无法控制，所以真正起到防除冰作用的只是通过改变表面材料的化学条件获得低表面能，不能发挥超疏水微结构的防除冰作用。

②服装纺织领域

超疏水材料应用于服装纺织领域，可使服装具有防水和自清洁能力，雨天衣服不被淋湿，同时减少清洗次数，节约水和洗涤剂的用量，保护有限的水资源。超疏水材料应用于服装上，还可起到保暖和降温的作用。

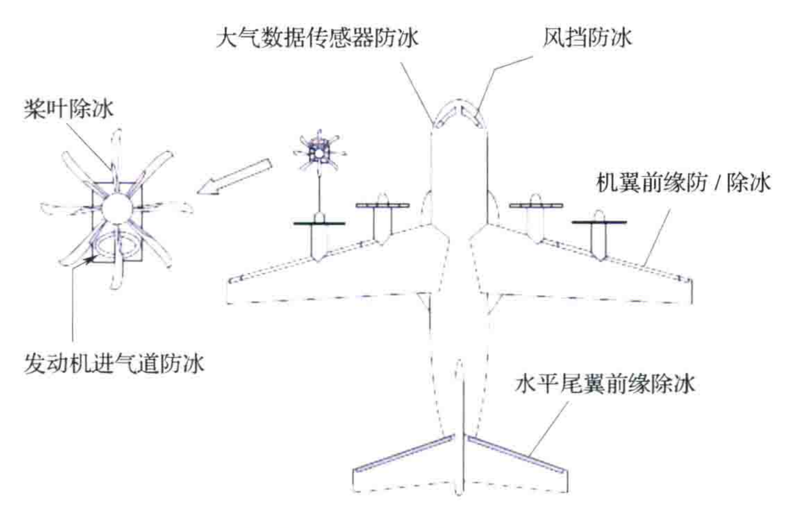


图 6－6　飞机易结冰部位示意图

③生物医学

超疏水材料还可应用于医疗器械和人造血管等生物医学材料，例如超疏水的薄膜表面几乎不吸附血小板，但是光滑的薄膜表面则易粘连大量的血小板，超疏水表面的血液相容性比普通薄膜更具有优势，同时研究表明超疏水材料表面可以改善血液的凝固性，为生物医学材料的发展提供出一个崭新的研究方向。

④液体输送

超疏水表面用于石油管道的原材料，可以防止石油在管道壁黏附，进而减少运输过程中的石油损耗及运输能量消耗，并且防止阻塞管道；应用于下水管道，可有效地防止腐蚀管道，延长管道使用寿命。

⑤日用品与包装

超疏水材料应用于产品包装将提高防水能力，由于超疏水材料表面具有较强的抗腐蚀、抗氧化的能力，因而可以使包装容器的寿命得到延长。

⑥建筑领域

超疏水表面材料用在室外天线、太阳能面板、光电转换器上可以防止雪的黏附，方便雨水冲洗掉外墙表面的灰尘，使建筑物外观保持清洁。超疏水表面应用于玻璃门窗可以起到自清洁的作用，从而不用人工清洁，水给高层建筑带来极大的方便。

⑦交通运输工具

超疏水材料应用在船舶的外壳、燃料箱上，可以达到抗污染；抗腐蚀的效果；用于水下核潜艇上，可以有效降低水的阻力，提高运行速度；用于汽车挡风玻璃上，不但可以有自清洁的效果，还可以防雾，提高人们在雨天和雾天驾驶汽车时的能见度。

6.1.2.2　微结构特征的减阻特性

（1）微结构特征减阻机理

20 世纪 70 年代 NASA 兰利研究中心发现，顺流向的微小沟槽（肋条）表面能有效地降低壁面摩阻，且具有一定尺度的 V 形沟槽为最佳减阻沟槽几何形状。用仿生非光滑技术改变近壁区流场，减小壁面摩擦阻力，不会给使用体带来附加设备、额外能量消耗和污染物，仅改变壁面形状就达到减阻效果。该发现彻底突破了表面越光滑阻力越小的传统思

维方式，沟槽减阻成为了湍流减阻技术中的研究焦点。

运动物体表面大部分区域，介质的流动处于湍流状态，各种湍流减阻技术主要是控制边界层内的湍流结构，从而达到控制湍流动能损耗，实现减阻目的。

从湍流拟序结构出发的“第二涡群论”认为，反向旋转的流向涡与尖锐的峰脊作用产生第二涡群，“二次涡”的产生和发展削弱了与低速条带相联系的流向涡强度，抑制了低速条带的形成并减弱了低速条带运动的不稳定性，即低速条带缓慢向上提升继而猝发的过程被减弱，流体微团间的动量交换减少，从而达到减阻效果。

从机械减阻原理出发的“空气轴承论”也可以解释沟槽减阻机理，该理论提出了“微型空气轴承”的概念，认为流动的小涡由于自身的涡能滞留在合适的凹槽内继续转动（或不转动），就像一支微型的空气轴承，根据滚动摩擦远小于滑动摩擦的原理，沟槽面获得减阻效果。

（2）减阻表面的应用

对于亚声速高速飞行器而言，壁面摩擦阻力约占总阻力的40%～50%。阻力与航速呈平方关系，与推进功率呈三次方关系；壁面摩擦阻力降低40%，则飞行器航程可提高29.1%，航行速度增大32%；较小的壁面摩擦阻力减阻效果，亦可产生巨大的收益。特别是，军事上对提高处于亚声速飞行的各种导弹、无人机的最高航行速度和最大航程具有显著的效果。

沟槽面减阻在国外已进入工程实用阶段，例如空中客车将A320试验机约70%的表面积贴上沟槽薄膜，获得了1%～2%的节油效果；德国飞机制造商也曾在飞机机身表面贴敷非光滑的三角形沟槽表面，获得节油8%的效果；NASA兰利中心对Learjet型飞机的飞行试验表明减阻6%的量级。20世纪90年代初美洲杯帆船赛上划艇底部沟槽技术的使用也曾一度吸引了公众的注意。KSB公司将多级泵的叶片表面加工成一定形状的沟槽后，综合效率提高了1.5%。DLRBerlin的研究机构对内衬沟槽面的输油或输水管道进行了减阻设计并发现管输量有不同程度的提高。国际泳衣品牌Speedo公司生产了具有沟槽表面的减阻泳衣，获得了3%～5%的水下减阻效果。国内方面，在1∶12运7原型金属模型上黏贴了顺流向沟槽薄膜后达到减少阻力5%～8%的效果。中国航天某研究院用亚、跨、超声速风洞对亚声速飞行器壁面沟槽的减阻性能进行测试，试验结果表明：在马赫数为0.4～0.9时，优化后的沟槽表面显著降低了壁面摩擦阻力，不同形式的沟槽减阻在不同的速度下减阻率达到10%～20%，最大能达到45%。

6.1.2.3 微结构特征的隐身特性

隐身技术目前的实现途径主要包括隐身外形技术、隐身结构技术以及隐身材料技术三类，其中隐身材料包括吸波透波材料、吸热隔热材料以及吸声阻尼声材料等，隐身外形技术包括反雷达探测、反红外探测以及反可见光探测等，隐身结构技术是指以整体结构和局部结构为对象，研究其合理的结构及组合形式达到减小目标暴露特征的目的。

生物体显示颜色的根本机理在于特殊的微结构体与可见光以及近红外波的物理作用过程，形成了不同波段电磁波的发射、吸收和透射特性。蝴蝶便是生物结构显色的杰出代表，通过对不同波段可见光向空间不同方向的反射，对外表现出绚丽的变化颜色。蝴蝶翅膀特殊的性能正是由于其表面特殊的微结构造成的。

根据此原理将其引伸到红外波段，研究表面微结构特征对红外发射率、红外反射率的

影响规律，探讨通过控制表面微结构从而控制目标光谱特征的方法，根据敌方的探测器类型、工作波段，设计表面微细结构，改变目标的光谱特征，使得目标光谱辐射在很大程度上甚至完全避开探测器的探测方向和探测频段，使得探测器完全失去效能，达到隐身的目的。这种基于微结构的光谱特征控制技术是隐身技术领域的新概念和新方法，可应用于飞机、地面军用车辆以及战术和战略导弹的隐身，为隐身技术研究提供了一个新方向，对促进隐身技术的研究和发展具有长远的影响。

微结构特征的隐身特性可以与前面所述的三种隐身方式结合，如在隐身外形表面或者无法进行隐身外形设计的表面附加特殊设计的微结构特征、在隐身材料上附加微结构特征，从而提高隐身效果。同时也可将不同的微结构相互叠加实现多波段的兼容，通过合理的设计，有望实现可见光、红外，甚至电磁多波段隐身的兼容，解决目前多波段难以兼容的隐身难题。

6.1.2.4　微结构功能表面的其他应用

（1）平板显示

液晶电视、立体电视、LED 照明等这几年发展很快，性能在提升，价格在下降。大屏幕电视保证画面画质均匀的技术实质是大型微细结构光学元件，即利用光学微细结构和散射微粒等，实现对光能的重新分布，达到特定的使用目的。例如增亮膜通过其表面系列微细结构使光线在通过膜片时，传播路径在一定角度内发生折射，让光线在较小的水平和垂直视角内传递，由于其表面的微细结构为棱镜结构，也被称为棱镜片。这样就可以用较少的光源均匀照亮整个屏幕，这也是液晶电视尺寸大、功率不大的原因，有利于节能环保。

（2）聚光太阳能

聚光光伏 CPV 系统（Concentrated Photovoltaic System）是利用光学元件将太阳光汇聚后再进行发电的聚光太阳能技术，被认为是太阳能发电发展趋势的第三代技术。菲涅尔透镜是聚光太阳能系统（CPV）中重要的光学部件之一。当透镜面垂直面向太阳时，光线将会被聚焦在电池片上，汇聚更多的能量，因而只需要较小的电池片面积，大大节约成本。

（3）道路标示及照明

各种反光膜主要制作各种反光标志标牌、车辆号牌、安全设施等，在白天以其鲜艳的色彩起到明显的警示作用，在夜间或光线不足的情况下，其明亮的反光效果可以有效地增强人的识别能力，成为道路交通不可缺少的安全卫士，有着明显的社会效益。无照明条件下，使用反光材料的醒目的交通标志标牌、车辆牌照可使交通事故下降 30% ~40% 。目前，高档的道路标识均采用了微结构光学膜片贴覆的方法生产。

LED 是公认的新一代高效节能照明光源，以 LED 为核心的半导体照明产业，正在引发全球性的照明光源的革命。而由于 LED 光源的体积小、光密度大，以及光的定向性强，造成光照不均匀，极易产生眩光，成为 LED 灯具推广应用必须解决的瓶颈问题。通过在反射板表面构建微透镜或微棱镜阵列，可以实现 LED 光线的高效扩散和高效漫反射，提高效率 30% ，有效地解决上述问题。

6.2　微结构特征的典型加工工艺

微结构功能表面在国防、军事以及民用等工业的实际应用中都具有很大优势：紧凑型

设计使得元件的轻量化和小型化成为可能；适应于机械设计约束；可以实现新型的光学设计概念；集成光学和机械功能。1998 年美国国家研究委员会发表了一篇题为《驾驭光——21 世纪的光科学与工程》的报告，该报告指出，具有高精度复杂微结构功能表面的光学元件的低成本加工有着极为重要的实际应用意义。2000 年德国的一篇题为《面向 21 世纪的光科学技术》的报告也指出，复杂微结构功能表面光学元件的制造是需要优先发展的技术之一。这些都充分显示出，微结构功能表面的高效率、低成本加工在 21 世纪的制造科学技术领域中占有非常重要的地位，也有着非常重要的科研价值。

目前微结构功能表面加工技术主要有：MEMS 技术，包括光刻技术、蚀刻技术、沉积和影像蚀刻技术、LIGA 技术等；特种加工技术，主要包括激光束加工、离子束加工、电子束加工以及电火花加工、微超声加工等工艺；复制技术，主要包括热压成形、模压成形、注射成形等技术；超精密加工技术，包括超精密金刚石车削、铣削、飞刀切削、金刚石砂轮成形磨削等。

随着应用领域的扩展，特别是微结构功能表面在光学领域的应用，人们发现对于微结构功能表面加工制造，传统的 MEMS 工艺技术、特种加工技术和激光直接写入技术等已经不能满足越来越多的复杂光学元件等的加工制作要求。而超精密加工技术以其确定性的加工和极高的表面质量等特点具有很大优势，比如能够加工真正的三维结构，加工零件的成形精度达亚微米级，表面粗糙度 *Ra* 达到纳米量级；能够加工大深宽比的结构和带有变化形态比的表面以及适合于多种材料的加工等。这种技术不但加工精度高，而且也可以大大降低加工成本，缩短生产周期。

6.2.1 传统 MEMS 工艺技术

传统的 MEMS 工艺是基于集成电路（IC）工艺技术，以薄膜沉积、图形化与刻蚀技术等对硅材料进行加工，主要应用于微型传感器、微型执行器和微系统的制作，技术相对成熟，在汽车、电子及军事领域得到了广泛应用。其特点是以硅为基本材料、只能进行准三维加工、但对设备和环境要求高。由于这种工艺可加工材料受到限制同时无法进行三维特征的加工，所以在表面微结构特征的加工方面受到了极大的限制。

LIGA 技术是 20 世纪 80 年代初期德国开发的，主要包括深层同步 X 射线光刻、电铸成形和注塑三个工艺过程。与传统的硅微加工方法相比，用 LIGA 技术进行微结构的微细加工具有如下特点：①可以制造高深宽比的微结构、精度高；②取材广泛，可以制造由各种金属材料以及塑料、玻璃、陶瓷等材料制成的微机械；③可以制造任意复制的平面图形结构；④可重复复制，具有大批量生产的特性。但 LIGA 技术的缺点是加工时间比较长、工艺过程复杂、价格昂贵。在 LIGA 技术基础上开发的 UV－LIGA 技术可称为准 LIGA 技术，该技术使用紫外光源对 SU－8 胶曝光，具有如下特点：①利用标准紫外光刻设备和掩模板；②易于 IC 集成；③可实现非硅的高深宽比微结构。UV－LIGA 技术包括两个主要的工艺：一是获得高深宽比胶模图形的光刻工艺，二是利用胶模进行金属沉积的微电铸工艺。

6.2.2 特种加工工艺技术

（1）微细电火花加工

微细电火花加工为非接触式加工，没有机械作用力，可以加工高硬度材料，在微细加

工中具有独特的工艺优势，但也存在电极损耗严重、加工效率低等缺点。

微细电火花加工同普通电火花加工的放电机理一样，在加工过程中，电极和工件不接触，利用电极和工件之间不断产生脉冲性火花放电，靠放电时局部、瞬时产生的高温把金属蚀除，从而形成所需的加工表面。由于微细电火花加工对象的尺寸通常在数十微米以下，为了达到加工的尺寸精度和表面质量要求，对微细电火花加工还有一些特殊的要求。微细电火花加工需要解决的难点和关键技术如下：

①由于放电面积很小，放电点的分布范围有限，极易造成放电位置和时间上的集中，增大了放电过程的不稳定，使微细电火花加工变得困难。

②单个脉冲放电能量很小。为适应放电面积极小的电火花放电状况要求，保证加工的尺寸精度和表面质量，每个脉冲的去除量应控制在0.10～0.01μm的范围内，因此必须将每个放电脉冲的能量控制在10^{-6}～10^{-7}J之间，甚至更小。

③放电间隙很小，该放电间隙的大小随加工条件的变化而变化，数值从数微米到数百微米不等。放电间隙的控制与变化规律直接影响加工质量、加工稳定性和加工效率。

④要加工出微小孔或微结构特征，必须先获得比其更小的微细工具电极，所以工具电极制备困难。线电极电火花磨削（WEDG）的出现，解决了微细电火花加工技术发展的瓶颈问题。为了获得极细的工具电极，要求具有高精度的WEDG系统，同时还要求电火花加工系统的主轴回转精度达到极高的水准，一般应控制在1μm以内。

⑤排屑困难，不易获得稳定火花放电状态。由于微结构特征加工时放电面积、放电间隙很小，极易造成短路，因此欲获得稳定的火花放电状态，其进给伺服控制系统必须有足够的灵敏度，在非正常放电时能快速地回退，消除间隙的异常状态，提高脉冲利用率，保护电极不受损坏。

（2）微细电解加工

微细电解是通过金属离子的还原或氧化对材料进行加工，材料的去除都是以离子的形态进行的，无宏观的切削力作用，且复制精度、重复精度、表面质量、加工效率、加工过程稳定性等方面都比较优良。

微细电解加工一般采用阳极掩膜方式进行，掩膜就是在被加工件上附上一层保护膜，使得被加工的部位露出，不被加工的部位保护起来，掩膜直接影响到加工最终微结构的形状、深度及精度等参数，是微细电解加工工艺的关键之一。

（3）短脉冲激光加工

以脉冲形式的飞秒激光具有脉冲时间极短、脉冲瞬时功率极高、聚焦电磁场场强极强的特点，飞秒激光可以将其能量全部、快速、准确地集中在限定的作用区域，实现对玻璃、陶瓷、金属、半导体、塑料、聚合物、树脂等材料的微纳尺度的加工，并具有以下特点：

①飞秒激光加工的组织中没有熔融区，没有重铸层，不产生微裂纹，大大减弱和消除了传统加工中热效应带来的负面影响；

②加工精度高，不受光的衍射极限的限制，具有很高的空间分辨性，加工区域可小于焦斑尺寸；

③飞秒激光加工需要的脉冲能量阈值极低，一般只有毫焦耳级，决定了加工能量的低耗性；

④加工过程不产生导致结构破坏的冲击波，不损伤临界的组织结构；

⑤对材料没有选择和限制性，可以对任何材料进行精细修复和处理。

（4）化学/电化学腐蚀

金属超疏水表面的制备在防腐蚀、减小舰船与水的摩擦及生物黏附等领域的科学意义和应用受到广泛关注。金属超疏水表面的制备方法目前大致可分为两类，一类是电化学法，即以金属材料为阳极，以惰性电极为阴极，施加电场，进行电化学加工后再进行一些后续处理获得粗糙结构，再修饰氟硅烷类低表面能物质进行疏水处理。电化学法应用范围广且容易控制，但往往需要大电流密度或较长时间。另一类是化学法，即通过酸或碱腐蚀形成粗糙结构而后修饰低表面能物质分子。化学法的优势在于对设备要求低，操作程序简单，但由于化学腐蚀的结果与晶型及杂质位点密切相关，因此，材料的选择受到限制，重复性和大批量加工的质量难以保证。目前，普遍认为微米/纳米二元复合粗糙结构是超疏水表面制备的关键，而化学腐蚀能快速获得微米级粗糙结构，电化学腐蚀则有利于均匀纳米结构的制备。

6.2.3 精密超精密机械加工技术

随着微结构功能表面应用领域的扩展，对其材料、形状、精度及表面质量的要求越来越高。作为传统加工三维形状的方法——切削、磨削技术，由于切削力大，以前在微细特征的加工方面应用不多。但是，随着机械加工机床精度的提高和超精密加工技术的发展，达到亚微米级的加工精度已经不是一件难事，例如依靠单晶金刚石进行镜面切削加工技术已经成熟，所以利用超精密切削加工以及超精密磨削加工技术进行微细结构件的加工已成为可能。而且微细切削加工、磨削加工技术还具有较快的加工速度，能加工各种材料以及各种复杂三维形状等特点。

（1）超精密铣削

超精密铣削可以实现三维微结构等复杂几何表面形貌和具有光学表面质量的自由曲面。但是铣削至少需要三轴联动机床才可以完成。如图 6 - 7 所示为典型的三轴超精密铣床及不同的铣刀，其中端铣刀可用来加工大宽深比微槽结构、球头铣削可以加工具有光学表面质量的自由曲面。超精密金刚石端面铣削，尤其是刀具与主轴同心的铣削方式加工微透镜阵列和大深宽比的凹槽从加工效率和加工精度方面来说是其他加工方式所不能代替的。

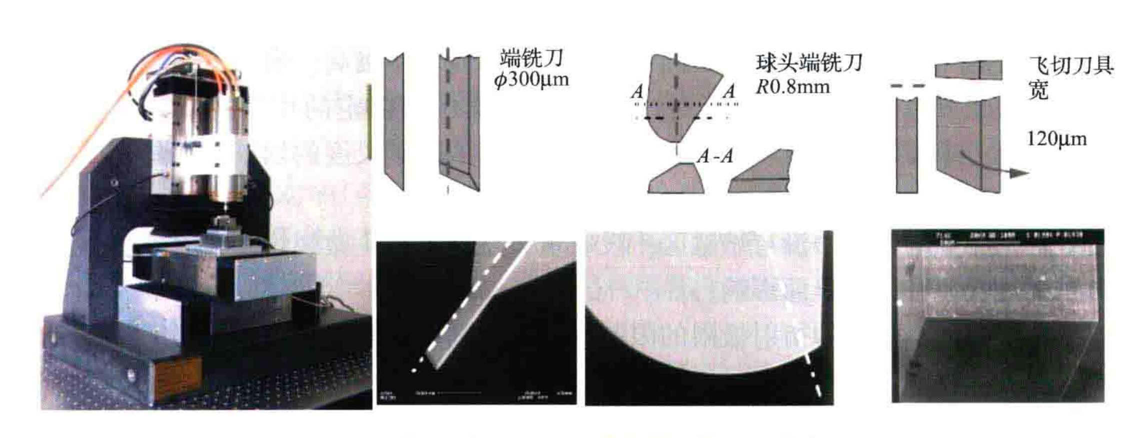


图 6 - 7　微结构超精密铣床及微铣刀

采用单晶金刚石微型刀具进行微细切削加工的设想很多年前就已经提出。有人利用单晶金刚石的棱边做微型刀具的刀刃，尝试进行金刚石刀具的微铣削加工，刀具的棱边是一段近似的圆弧，且该段圆弧离回转中心相距一定微小距离；有人称这种刀具为伪球头铣刀，图6-8为其原理示意图。这种方式的加工试验取得了良好的效果，但这样的刀具从选材到使用都很苛刻，人们开始制造标准形状的单晶金刚石微型刀具。

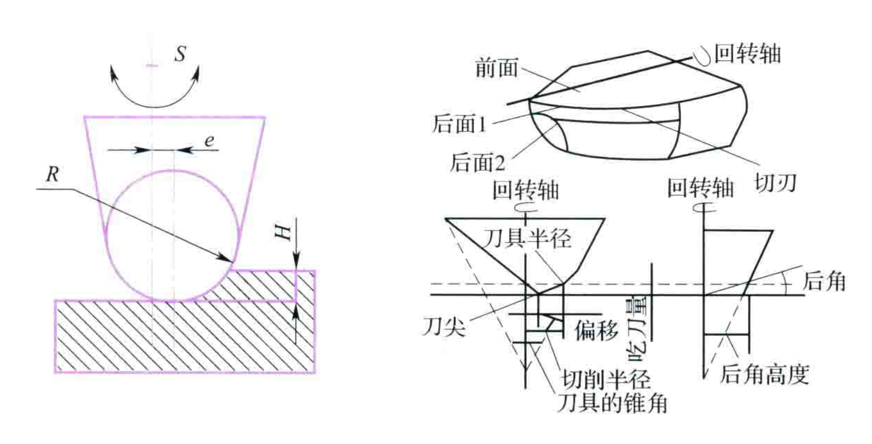


图6-8 微结构特征三轴超精密铣削及典型单晶金刚石铣刀

（2）飞切加工

金刚石飞刀切削加工（飞切加工）与其他金刚石加工方法相比能加工出比较复杂的表面微结构特征，尤其对于线性微槽结构和由多条相交线组成的微槽结构阵列，重复性的棱柱矩阵、金字塔矩阵和应用于特殊反射表面涂层、薄片和磁带的微结构的加工，金刚石飞切加工都起着极其重要的作用，如图6-9所示。并且对于平面非回转结构的加工，飞刀切削是最经济的金刚石加工方法，因为在加工中刀具不需要做较大的调整。它可以在没有后期抛光的情况下直接加工出具有纳米级表面质量和亚微米级面形精度的微结构表面。由于金刚石飞刀切削加工在微结构功能表面加工制造方面的众多优势，其被广泛地应用于通信设备、医疗设备、微光学元件等的制造中。

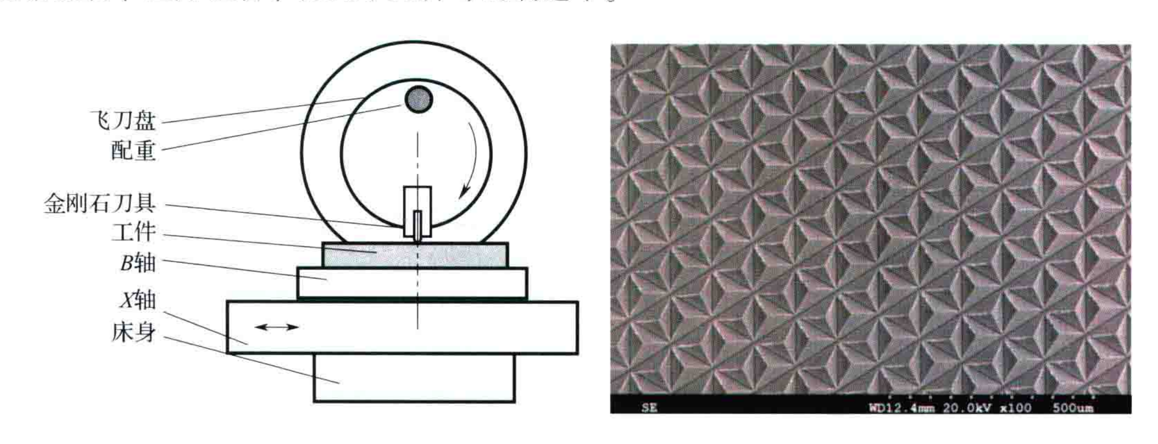
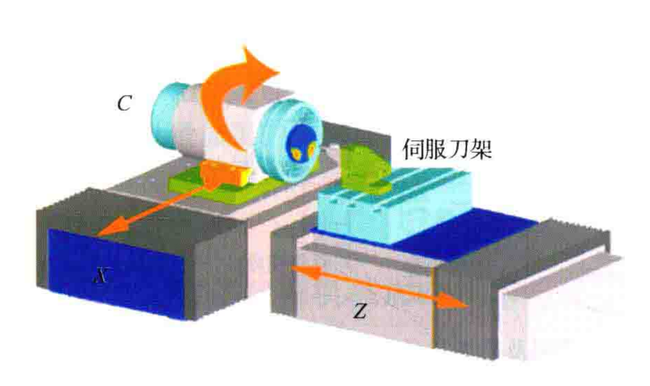


图6-9 飞切加工原理及典型加工微结构特征

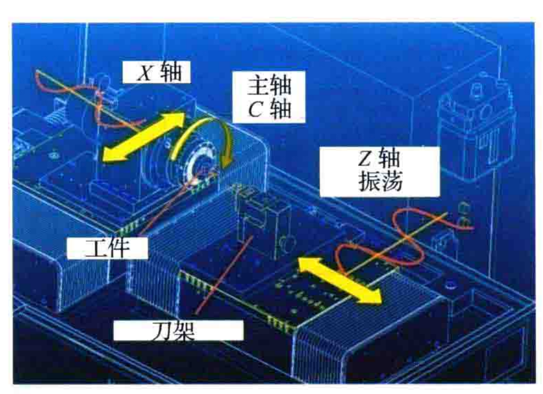
（3）快速刀具伺服（FTS）及慢拖板伺服加工（S^3）

快速刀具伺服系统是在车床上安装伺服刀架作为辅助加工轴，即将所加工表面看成是两部分叠加而成的，一个是作为基面的回转对称曲面，另一个是基面上的微结构，如图

6－10（a）所示。其中回转对称面轨迹由超精密车床的主轴 X 轴和 Z 轴的联动实现加工，微结构表面由快速刀具伺服系统在 Z 轴方向上产生一个微进给实现加工。与传统的车削加工相比，使用 FTS 进行辅助加工，具有明显的优点：用 FTS 配合超精密车床进行复杂面形零件或微结构特征的加工可以简化车床刀具和工件的布局，简化对车床多轴联动的要求，因此可以简化实际的加工过程，缩短加工周期。由于快刀伺服装置是一种附加装置，仅仅读取主轴和直线运动轴位置信息，一般没有采取多轴联动方式，因此在实施控制过程中，主轴位置估计误差会造成加工轮廓混淆现象。



（a）快速刀具伺服加工

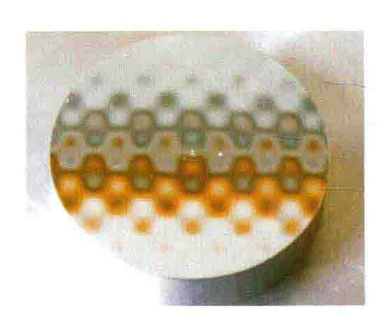


（b）慢速拖板伺服加工

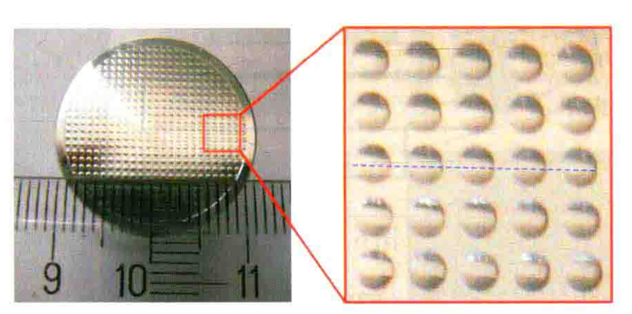
图 6－10　快刀伺服加工及慢拖板伺服加工示意图

慢拖板伺服加工又称慢刀伺服加工，慢刀伺服加工是一个 X、Z、C 三轴联动的系统，两个直线轴 X、Z 和旋转轴 C 均为位置精确控制，如图 6－10（b）所示。主轴即 C 轴安装在 X 轴上，主轴上有真空吸盘用于吸附工件，刀架安装在 Z 轴上。机床的三个轴在空间上组成了一个柱坐标系，任意自由曲面工件都可以通过三个轴的联动实现加工。

慢刀伺服加工与快刀伺服加工技术虽然有很多相似之处，但本质上是不同的。快刀伺服加工中由专门的刀架提供往复运动，虽然频响提高，但行程受到很大限制，而且增加了加工系统的复杂性；而慢刀伺服加工直接控制 Z 轴做往复运动，行程大大增加，但频响无法达到很高。快刀伺服加工中刀架的控制与机床 X、C 轴的控制是分离的，通过读取 X、C 轴的位置计算得到 Z 轴的位置单独控制伺服刀架进行往复运动，存在时滞现象；而慢刀伺服加工 X、Z、C 三轴联动进行加工，因此，慢刀伺服加工没有时滞，理论上可以得到更高精度的面形。图 6－11 为采用慢拖板伺服加工技术和快刀伺服加工技术加工的典型样件。



（a）双正弦波曲面



（b）微透镜阵列

图 6－11　快刀伺服加工和慢拖板伺服加工典型样件

（4）金刚石微凿切技术

德国开发了金刚石微凿切（Diamond Microchiseling，DMC）技术，可加工出 FTS 或其他微铣削难以加工的微结构。DMC 是基于 V 形单晶金刚石刀具，与用于飞刀铣削三角阵列的刀具类似，适合切削尺寸为 50 ~ 500μm 的微结构。典型切削顺序如图 6 - 12 所示。加工一个四面体锥体腔，刀尖沿着欲加工锥体第一面的边线刺入材料。这个过程必须重复三次从而从腔体内去除切屑。加工装置通过整合由计算机驱动的三个线性轴以及两个转动轴来实现。早期的试验显示，加工的腔体表面内质量可得到保障，在加工无氧高导电铜和无电解镍材料时，实现了亚微米精度的表面质量而不会引起金刚石刀具的磨损。DMC 的一个优点就是每一超镜面可通过一次薄切削（2 ~ 4μm）而获得，运动学粗糙度等的影响不会发生，因此，表面的加工质量主要依赖于切削刃和机床特性。

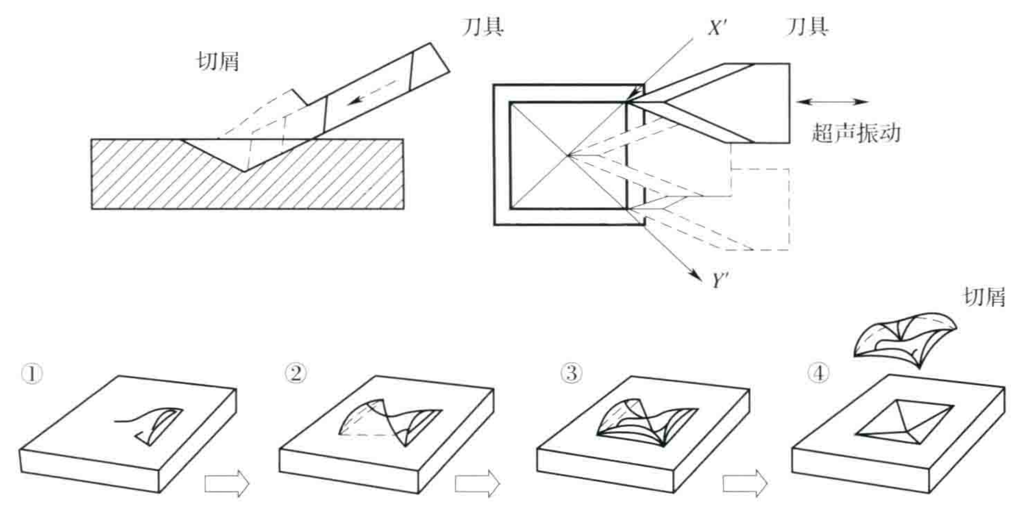


图 6 - 12　金刚石微凿切技术

（5）超精密磨削

在微结构光学功能表面的复制过程中，模具的表面质量对最终的产品性能和成本控制起着决定性的作用。随着被复制表面光学性能要求以及模压温度的不断提高，其模具材料正在向碳化硅、碳化钨和氮化硅等具有高硬度、耐高温、耐磨损、化学稳定性好等特征的超硬材料发展，从而提高模具的使用寿命和保证精度长期一致性。因此，研究开发针对微结构功能表面模具的高效率超精密磨削加工工艺是微结构功能表面实现确定性、经济性与大批量生产的关键。微结构特征超精密磨削加工中存在的技术难点如下：

①微结构磨削用砂轮的精密修整

在微结构功能表面模具的超精密磨削加工中，砂轮的几何形状受到微结构表面几何尺寸的制约，通常具有微小精密的几何外观尺寸，在磨削加工过程中砂轮的尖锐部分极易磨损。为了减少砂轮磨损，在微结构光学功能元件模具加工中常使用高浓度细粒度的金刚石或立方氮化硼磨粒。同时为了更好地保证磨削后表面的面形精度，加工时还需要对砂轮进行多次精密修整，砂轮的修整精度将直接影响最终加工的微结构表面精度。

②微结构磨削表面质量不均一性

由于微结构表面具有很强的非连续性，其磨削状态（如磨削力、磨削轨迹和材料去

除率等）受表面结构性的影响，磨削后微结构表面各点表面质量不同，即表面质量不均一。同时这种不稳定的加工状态也使得在相同情况下，磨削后的微结构表面比平面和球面等传统连续表面更难获得良好的表面质量。

③微结构表面尖锐部分的精度保证

微结构光学功能元件是由多个离散表面组成的非连续表面，因此在两个或多个离散表面交汇处都会形成尖锐部分。加工中由于磨削力以及砂轮磨损的存在，使得在这些尖锐处极易发生钝化现象，损失面形精度。此外，由于模具材料通常具有硬脆特性，因此在加工中微结构的尖锐部分很容易发生断裂破损，从而进一步损失面形精度，最终影响复制后微结构光学功能表面的光学性能。

为了克服上述难点，提高加工特征的质量，可采取以下措施：

①研究更加适合于微结构光学模具的超精密磨削方法。如超声振动辅助磨削，从而提高加工效率；改变磨削轨迹，从而减少由表面结构性引起的表面质量不均一现象；减小磨削力，从而减少砂轮的磨损以及提高尖锐部分的加工精度。

②研究更适用于微结构光学功能元件模具的磨削工具以及能够实现更高精度和效率的精密修整技术。

③研究更适用于微结构表面的磨削轨迹规划方法以及超精密磨削加工后的微结构亚表面完整性研究。

④另外随着微结构表面超精密磨削加工技术的不断深入，微结构表面质量的在位检测技术、微结构磨削工具的在线监测技术以及过程仿真技术等也逐渐引起人们的重视和兴趣。

6.2.4 低成本大尺寸微结构功能表面的制备

为满足大尺寸面积的微结构功能表面的低成本、高效率、高精度地制造的需求，卷式（Roll－to－Roll）复制加工技术被看做是一种最具前景的工艺方法。而 Roll－to－Roll 生产工艺中最为关键的技术就是模辊的加工，超精密金刚石车削技术是加工此类模辊的重要手段。

在光学功能薄膜的压印生产过程中，压印模辊的制造技术直接影响透镜表面微结构的成形质量，其关键在于辊筒表面上具有复杂形貌微结构的加工，如图 6－13 所示，然而一般的刀具在金属表面是不能加工出这种超精密微结构表面的，单点金刚石刀具是国际上公认的能够进行这种超精密加工的刀具，但其并非在任何金属表面都能实现这种超精密加工，而是只有在铝、铜及其合金的表面或一些特殊的合金镀层（Ni－P 合金）表面上才能实现这种超精密加工。



图 6－13　辊筒超精密切削加工设备及辊筒模具

目前国内外通用的做法是在铜表面进行这种微结构加工，但是如果整个模辊采用纯铜制造，由于材料成本高、辊筒重量大，长期使用会在重力和挤压载荷的综合作用下发生翘曲变形，无法压印出所需精度的光学透镜，导致铜辊报废。因此，目前均是在钢制辊筒表面通过快速镀铜工艺来代替纯铜模辊，一方面可大幅度降低材料成本，还能够延长使用寿命。但是由于纯铜的高光洁度表面会在短时间内氧化，影响功能表面的成形精度，同时，受纯铜硬度的影响，这样的模辊使用寿命非常短，通常只能成形2000～3000张产品就必须重新加工微结构表面，且铜辊的保存需要在氮气的环境下才不会氧化，使生产成本增加很高。

超精密模具电铸镍－磷合金技术是随着光电显示产业的发展而出现的，菲涅尔镜MD光栅屏幕、TFT－LCD增光膜生产等都需要超精密模具加工。这种加工必须在镍－磷合金上才能获得高精度、高光洁度。镍－磷合金可以使用金刚石加工，获得极高的粗糙度(10nm以内)，可极大地提高模具的使用寿命，方便加工大尺寸的精密模具。

电铸沉积方法获得的镍－磷合金，镀层均匀、附着力强，高磷沉积方法获得的镍磷含量的非晶体，理论上实现模辊的零磨损，是更环保的一种创新电铸沉积的新材料、新工艺方法。特别是在光栅模辊上采用镍－磷合金辊，可使其寿命增加3～10倍。该工艺方法有如下优势：

①磷合金中的磷含量高达7.5%以上，镀层厚度0.4～1mm，模辊（具）加工面积大，可满足光电显示器件的大尺寸应用。

②过程中不产生铬合金离子，是一项比传统电铸铬更加环保的新型镍－磷合金新型材料、新工艺生产技术。

实现微结构功能表面辊筒模具的超精密加工需要解决以下关键技术：超精密加工机床设计、制造技术基础技术；辊筒涂层制备及其超精密加工工艺技术；微圆弧金刚石刀具的精密刃磨技术；加工质量检测及工艺过程监控技术；压印辊筒工程应用关键配套技术等。

6.3 单晶金刚石微型刀具设计及制造技术

6.3.1 概述

6.3.1.1 微细切削刀具的基本特点

微细切削刀具是微细切削技术中的重要组成部分，微细切削技术的发展依赖于微细切削刀具技术的支撑。目前应用较多的微细切削方法主要有微细车削、微细立铣削、微细飞切和微细钻削，使用的微细切削刀具相应为微细车刀、平头及球头立铣刀、飞刀和钻头。

微细切削刀具不是传统切削刀具在整体尺度或局部特征尺度上的简单缩小，而是基于微细切削的特点与加工机理，面向多种材料微小零件或结构具体加工需求的一类特种切削刀具。受尺度效应的影响，微细切削的刀具磨（破）损、切削力、切削表面形成等加工机理显著区别于常规尺度切削，刀具所承受的切削抗力、摩擦和冲击等工况条件更为恶劣。适用于微细切削的刀具应满足以下基本要求：

(1) 整体尺度小，且局部特征尺度微小

针对微小型系统中广泛存在的框架、平面、曲面、轴、槽、壁、孔等各类微小型结构，为了适应微细切削加工特征微小、加工精度较高的特点，以及避免与工件之间的干涉，切削刀具的整体尺度和切削部分的特征尺度必须同步减小。

（2）切削刃锋利

在微细切削条件下，为了实现极微量的材料去除，所采用的切削深度和进给量通常在微米级，切削厚度与刀具刃口半径处于同一数量级，刃口半径对于微细切削性能的影响不容忽视，切削刀具应具有足够锋利的切削刃。但是，受刀具材料特性和制造工艺的限制，刃口半径还不能随刀具整体尺度的降低而成比例地降低。

（3）表面质量好

为了获得良好的微细切削精度和表面质量，微细刀具应具有较高的表面完整性及较小的表面粗糙度和微观成形缺陷。较差的表面质量不仅会增加微细切削时的摩擦阻力，导致加工表面恶化，而且会削弱刀具强度。

（4）强度高，抗冲击能力强

微细切削刀具的切削部分应具备足够高的强度和动态特性，能够承受微细切削时的高频冲击负载。

（5）刚性好，抗变形能力强

为保证加工精度，微细刀具应具有较高的刚性，以减小切削力作用下的变形和回弹。微细立铣削时，刀具刚性不足引起的轴向和径向变形是影响加工精度的主要原因；微细钻削时，钻头变形量过大引起的折断将导致工件报废。

（6）耐磨性好，磨损过程均匀

微细切削刀具的切削部分应具有足够高的硬度，以保证其耐磨性。用已磨钝的刀具进行微细切削，不仅影响加工精度，并且会产生明显的加工毛刺，给表面精整带来困难。

（7）动平衡精度高

为保证刀尖运动轨迹和加工精度，微细立铣刀、钻头等旋转刀具应具有极高的动平衡精度，使用前必须随同刀柄系统进行动平衡测试。

（8）刀具夹持精确可靠

微细旋转刀具的安装误差是影响加工精度和可靠性的主要因素。刀具夹持系统应具有较高的接触刚度和重复定位精度，并具有良好的高速锁紧性。

6.3.1.2　单晶金刚石微型刀具的特点及发展

单晶金刚石微型刀具是指采用单晶金刚石制造的外形尺寸极小、主要用于微小零件或微结构特征的超精密切削加工用的刀具。例如，直径小于0.2mm的立铣刀和球头铣刀，宽度数微米的槽铣刀和尺寸极小成形轮廓刀等。这些刀具用于微小零件特征的超精密切削加工，实现具有超光滑表面和超精密尺寸精度的三维微小零件特征。

微型单晶金刚石刀具是实现微小零件特征超精密加工的关键。众所周知，在常规尺寸的超精密切削加工中只有采用单晶金刚石刀具才能达到超精密的效果，目前无任何其他刀具材料可以代替；原因是只有单晶金刚石刀具的刃口可以做到如此锋利，刀具刃口半径可以小到0.1μm以下，刀具表面粗糙度达到纳米级。

对于微小零件特征的制造，单晶金刚石刀具的优良特性更为重要，因为当零件特征十分微小时，只有特征表面达到很低的粗糙度，才能形成完整准确的特征形状；而且很多微结构特征是用于光学功能元件，例如现在发展很快的微透镜阵列等微光学元件，微结构特征表面更需要达到光学镜面。这样精度的要求，只有采用单晶金刚石刀具的切削加工才能达到。

单晶金刚石是制作微型刀具最适合的材料，这是因为单晶金刚石硬度和强度高，有利

于形成锋利的切削刃口，同时有足够的强度承受切削力而不致变形和断裂。就形成锋利的刃口而言，单晶金刚石也是无可替代的；目前商品化的单晶金刚石刀具，其刃口半径ρ小于0.2μm，用此种刀具能实现的最小切削厚度达到0.1μm，这是采用其他刀具材料不能达到的。另一方面，金刚石的强度比一般材料高，这使得尺寸十分微小的单晶金刚石刀具能够承受切削时的切削力而不致断裂。

制作单晶金刚石微型刀具难点在于如何对单晶金刚石进行成形加工和刃磨。制作普通材料的微型刀具，采用比刀具材料硬度更高的砂轮直接磨削完成，这种磨削过程被认为砂轮基本不磨损。目前商品化的硬质合金微型立铣刀和球头铣刀，直径可以做到小于100μm，其成形和刃磨靠砂轮磨削直接完成。单晶金刚石是目前所知自然界最硬的材料，传统的金刚石刀具成形和刃磨是靠“利用金刚石加工金刚石”，这种方法已经沿用了数百年，也是目前仍然在普遍采用的方法。这种方法是靠金刚石磨盘与金刚石刀具的相互磨损来完成刀具外形轮廓的加工；由于单晶金刚石的各向异性，在避开单晶金刚石的最硬磨削方向时，单晶金刚石可以进行研磨或磨削加工。尽管这种方式的加工效率不高，但目前仍是单晶金刚石刀具成形的主要方法。

微型单晶金刚石刀具的成形加工与宏观尺寸的单晶刀具有所不同，宏观尺寸单晶刀具成形加工主要考虑提高效率和保证刀具的形状精度；而微型单晶刀具的成形加工，最主要的矛盾是如何加工成形出尺寸微小的刀具而刀具不断裂。由于金刚石的高硬度和脆性，磨削时的加工力比较大，刀具极其容易断裂。克服这一问题需要从多方面入手，一方面选用优质纯净的金刚石毛坯原料，减少刀具材料的裂纹等缺陷；另一方面采取合理的工艺路线和方法，选用适当的砂轮和其他工艺参数，控制磨削力和加工的平稳性。

国内一些高校从事采用普通刀具材料（例如硬质合金和高速钢等）制造微型刀具的技术研究，例如南京航空航天大学采用在线电加工的方法制造硬质合金微型刀具，可以将刀具直径做到数十微米以下。单晶金刚石微型刀具的成形和刃磨方法与普通刀具材料的刃磨方法完全不同。达到实用要求的商品化的微型单晶金刚石刀具数年前在日本研制成功。日本在微结构制造技术方面非常积极，最早提出了利用超精密加工手段制造微机械零件，并开展了多方面的研究工作。日本Osaka（大阪金刚石）公司是世界上制造金刚石刀具实力最强的公司之一，该公司研制了系列的单晶金刚石微型刀具并已经提供产品，包括立铣刀、球头铣刀、槽刀和成形轮廓刀等，其中单晶金刚石球头铣刀的最小半径小于30μm。近年来这些单晶金刚石微型刀具得到了迅速推广应用。

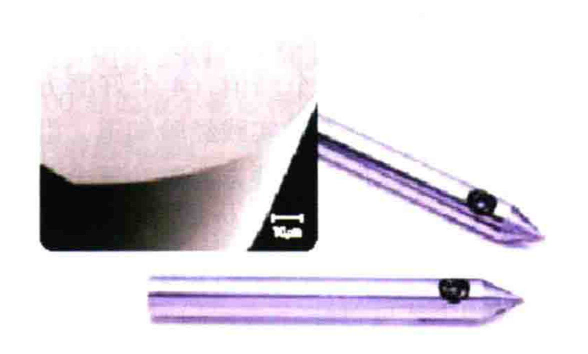
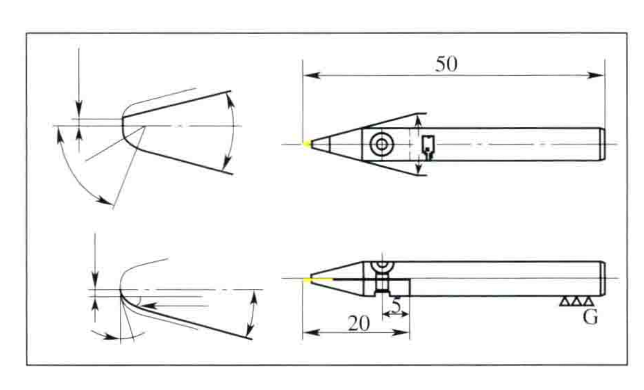



图6-14 日本大阪金刚石公司生产的微型金刚石球头铣刀

6.3.2 微型单晶金刚石刀具的设计基础研究

6.3.2.1 单晶金刚石材料的特性

微型单晶金刚石刀具的设计原则与传统单晶金刚石刀具设计所考虑的主要问题是一致的。金刚石是单一碳原子的结晶体，其晶体结构属等轴面心立方晶系。独特的晶体结构使金刚石是自然界物质中硬度最高的材料，同时具有高刚性、高折射率、高导热系数以及优良的抗磨损、抗腐蚀性和化学稳定性等。单晶金刚石的优良特性可满足超精密切削对刀具材料的要求，是理想的超精密切削刀具材料。单晶金刚石无内部晶界的晶体结构使得能够获得最锋利的刀具刃口，实现纳米级的切薄能力和表面粗糙度。天然金刚石的高硬度保证了刀具的超长寿命，能实现持续长久的正常切削，减少由于刀具磨损对加工精度的影响；其较高的导热系数又可降低切削温度和零件的热变形。

另一方面，由于天然金刚石的独特性能，使得对其自身的加工非常困难。由于天然金刚石具有极高硬度，传统的工艺方法只能是用金刚石进行研磨加工。单晶金刚石不仅成形加工十分困难，而且由于天然金刚石浸润性差，焊接性能极差，给刀具制造带来了很大困难。

单晶金刚石是立方晶系，基本晶面分别是 100 面、110 面和 111 面。常遇到的晶体形状为 8 面体、12 面体和 6 面体等。金刚石具有各向异性，不同的晶面物理性能相差很大，同一晶面的不同方向物理性能也有很大差异。图 6－15 为最常见的 8 面体结构的基本晶面。

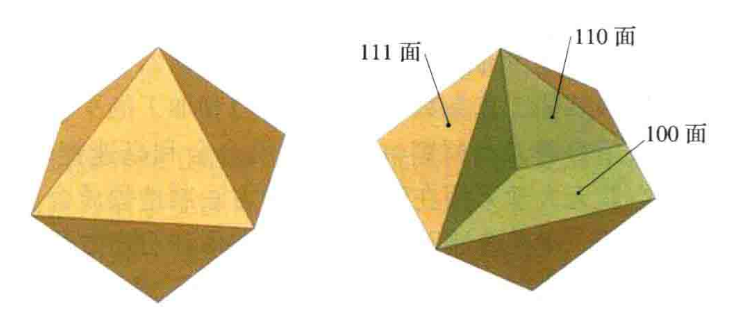


图 6－15　面体单晶金刚石和其基本晶面

金刚石不同晶面物理性能差异很大，同一晶面不同方向磨削性能也有很大差异。金刚石的耐磨性能可以用相对磨削率表示；在对金刚石进行磨削加工时，各个晶面都有“好磨”和“难磨”方向，磨削率相差甚大。因此，制造单晶金刚石刀具既要考虑对刀具使用有很大影响的金刚石的解理面，考虑选择合理的晶面做刀具的前刀面和后刀面，又要综合考虑刀具的使用寿命和刀具的制造难易程度可行性。

111 晶面的磨削率有 3 个峰值（3 个好磨方向），100 晶面有 4 个峰值（4 个好磨方向），110 晶面有 2 个峰值（2 个好磨方向），如图 6－16 所示。长期的实践经验知道，沿 111 晶面的难磨方向，单晶金刚石是基本不能进行磨削加工的。同在易磨方向时，三个晶面的磨削率比值如下：111 晶面∶100 晶面∶110 晶面＝1∶5.8∶12.8；在相对较易磨削的 110 晶面，其难磨方向与好磨方向的磨削率相差也很大，沿着难磨方向也基本无法磨削。可见，单晶刀具的设计要充分考虑刀具晶面选择的合理性和工艺可行性。

6.3.2.2 金刚石微型刀具的选料与晶体定向

微型单晶金刚石刀具制造的第一步是选料：由于微型单晶刀具制造的最大难点是将单

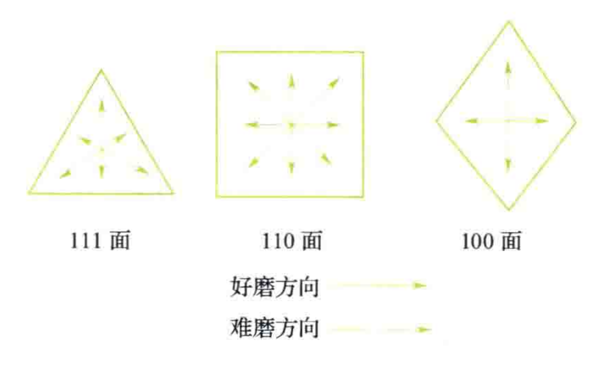


图 6－16　单晶金刚石晶面的好磨与难磨方向

晶金刚石加工成极其微小的尺寸，刀具很容易断裂，所以微型刀具的选料比传统单晶刀具要求更高。选择晶体纯正、无内部缺陷、晶形完整晶体，是刀具制造能否成功的基础。选择合适的原材料不仅可以保证刀具的质量，而且可以避免浪费金刚石原材料而增加加工成本。

由于单晶金刚石的特殊性，单晶金刚石刀具制造的最大难点，一方面是要能磨削去除余量，实现刀具的成形加工，就是所谓“磨得动”；另一方面是是磨出锋利的刃口。一般刀具用金刚石原材料要求晶体完整、无裂痕，晶体表面应该尽量平整，最大直径处一般应不小于 3mm。金刚石中的碳原子与碳原子之间是以较大力量的共价键结合在一起的。金刚石具有平行（111）完全解理，并且该面很难磨削。平行八面体面方向（111 面）施加一定的力后，金刚石非常容易破裂。选择高质量的金刚石晶体原料是制造刀具的第一步。

单晶金刚石分为天然单晶和人造单晶金刚石；天然单晶金刚石的形状千差万别，颜色也有多种，其中茶色硬度高，黄色韧性好。天然单晶金刚石的标准结晶形是正八面体、十二面体和六面体等，但多数天然单晶金刚石的晶形并不完整，还有几种晶形的复合体等。天然金刚石中可以找到十分纯净的晶体，传统金刚石刀具制造多采用天然金刚石。人造单晶金刚石的形状规则，颜色统一，但一般不够纯净。近年随着人造单晶金刚石生长技术的发展，人造单晶水平逐步提高，晶体尺寸越来越大，价格也逐步降低，现在单晶金刚石刀具制造原料越来越多地采用人造单晶。

磨出一把高质量单晶金刚石刀具，必须掌握单晶金刚石晶体定向技术。这是由于单晶金刚石的各向异性的特点决定。选择合适的晶面和晶向作为刀具的前刀面、后刀面，使其耐磨性和加工性能达到最好。金刚石晶体各晶面在好磨方向上，111 晶面的磨削率最低，100 晶面次之，110 晶面磨削率最高。由于 111 晶面硬度太高，研磨加工困难，而且微观强度不高，易解理，很难磨出锋利刃口。110 晶面在好磨方向上磨削率比 100 晶面高近一倍，但从金刚石不同晶面产生破损的概率来看，110 晶面的破损概率最大，111 晶面次之，100 晶面最不易破损。因此从刀具制造角度看，虽然 100 晶面的研磨效率低于 110 晶面，但最后精磨时，由于 100 晶面微观强度高，更易于获得完美刃口。因此从刀具的制造工艺和刀具耐用度综合考虑，可以选择 100 晶面或 110 晶面做为刀具的前、后刀面，图 6－17 为单晶金刚石制做刀具的几种晶面选择方案。

A 方案刃口抗机械磨损性好，B 和 D 方案刃口寿命长，C 方案刃口抗崩刃性能好、微观强度高。对金刚石刀具来说，刀刃处的解理破损是磨损和破损的主要形式，刀刃的微观强度是刀具设计选择晶面的重要依据。从刀具的制造工艺和刀具耐用度综合考虑，传统单晶刀具一般选择 100 晶面为刀具的前、后刀面。

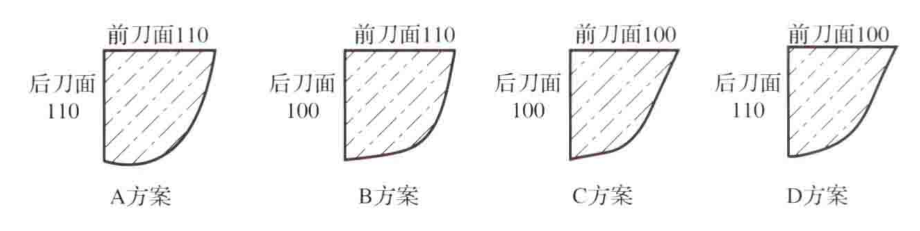


图 6－17 单晶金刚石刀具晶面的选择方案

微型单晶金刚石刀具由于制造更困难，且现在刚刚开始研制，需要更多考虑工艺难度，所以我们试制的微型刀具，对立铣刀的侧刃选择 A 方案，即选择 110 面为前后刀面，对立铣刀的端刃口选择 B 方案，即 110 晶面为前刀面，100 晶面为后刀面。

此外还要选择最佳的研磨方向，如果找到了金刚石的最佳研磨方向，研磨工作可获得最高的研磨效率和研磨质量。

单晶金刚石晶体的准确定向是制造性能优良刀具的基础。超精密金刚石刀头必须准确定向。单晶金刚石（100）晶面左右、上下对称，呈正方形结构；（111）晶面呈 120°对称，呈三角形结构；（110）晶面 180°左右对称，呈棱边结构。

目前实用化晶体定向方法主要有 3 种：人工目测定向、X 光晶体定向和激光晶体定向。这些定向方法在其他资料中有详细论述。

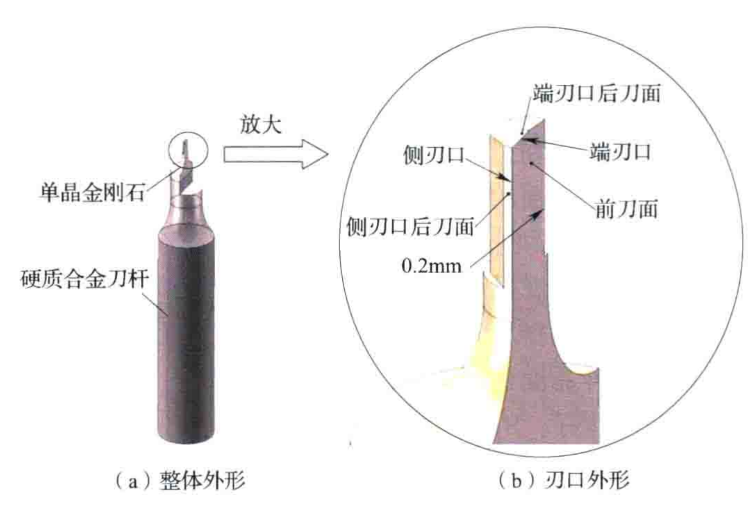
6.3.3 微型单晶金刚石刀具的工艺流程设计

微型单晶金刚石刀具的外形不可能像普通刀具那样具有理想的复杂外形，只能是简单的平面或圆弧面组成，最大程度地简化以便降低工艺难度。

微型单晶金刚石铣刀按照刃口轮廓形状分为圆柱立铣刀和球头铣刀；按照安装方式分为焊接刀杆式和装夹式。焊接刀杆式使用方便，但磨削工艺受到一定限制；装夹式安装和使用需要一定条件。球头铣刀制造难度大于圆柱立铣刀，下面以焊接刀杆式圆柱立铣刀、装夹式立铣刀和球头铣刀为例进行微型单晶金刚石刀具参数及工艺流程的设计。

6.3.3.1 焊接刀杆式微型单晶金刚石圆柱立铣刀

图 6－18 是焊接刀杆式单晶金刚石微型圆柱立铣刀的整体外形和刃口刀面外形图。



（a）整体外形　　（b）刃口外形

图 6－18 焊接刀杆式单晶金刚石微型圆柱立铣刀

微型圆柱立铣刀的设计直径 0.2mm，刃口长度 0.4mm，长径比 2。

刀杆焊接式微型刀具的优点是使用方便，粗磨工艺性较好，但前刀面成形和刃磨工艺性差。焊接刀杆式圆柱立铣刀的设计工序流程如下：

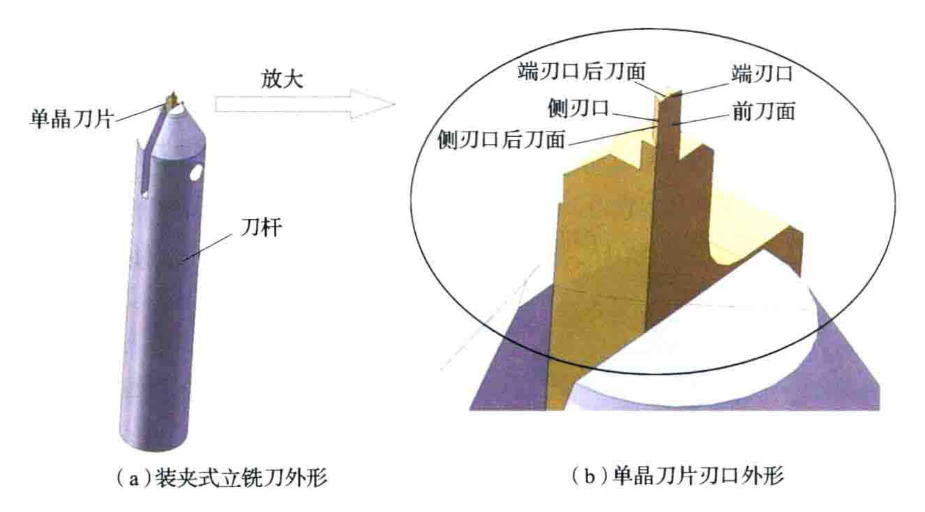
选材和晶体定向（见图 6－19（a））⟶切割和刀杆焊接（见图 6－19（b））⟶粗磨减径过渡外圆和端刃后刀面（见图 6－19（c））⟶磨削圆柱立铣刀圆柱后刀面和前刀面平面（见图 6－19（d））⟶磨削圆柱立铣刀侧刃辅助后刀面（见图 6－19（e））⟶磨削圆柱立铣刀端刃辅助后刀面（见图 6－19（f））⟶精研磨前刀面（修刃口）（见图 6－19（g））。



图 6－19　焊接刀杆式微型单晶金刚石圆柱立铣刀工艺流程

6.3.3.2 装夹式微型单晶金刚石圆柱立铣刀

装夹式微型刀具使用时需要调整刀刃位置，使用方便性不如焊接刀杆式方便，且刀具高速回转运动时动平衡性能不好；装夹式微型单晶立铣刀设计如图 6－20 所示。

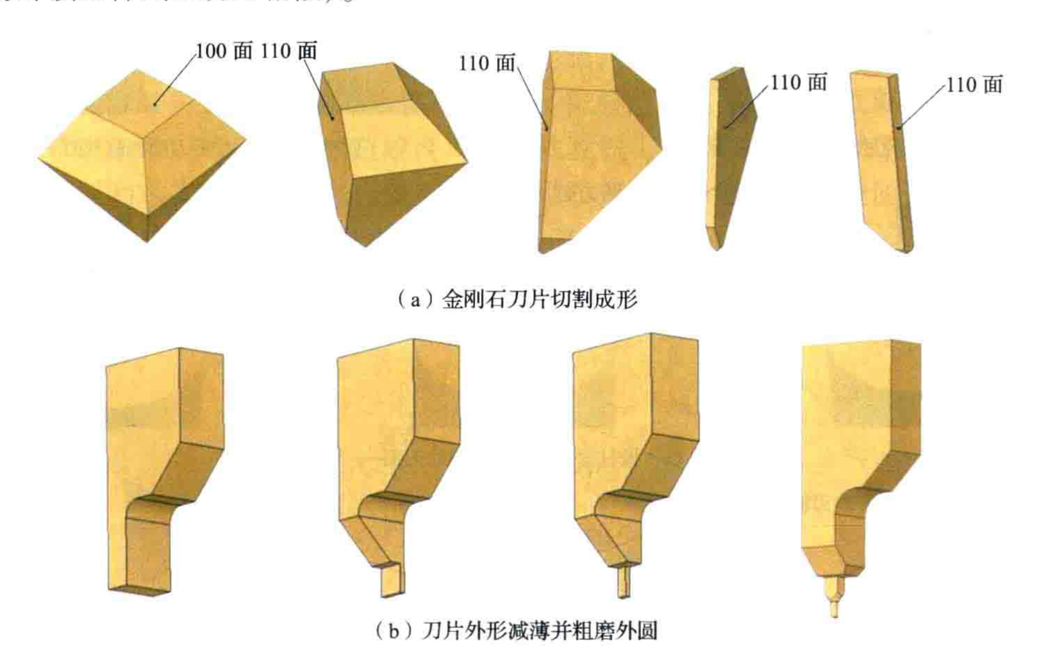


（a）装夹式立铣刀外形　　（b）单晶刀片刃口外形

图 6－20　装夹式微型单晶立铣刀

微型立铣刀单晶刀片成形和刃磨工序流程如下：

选材和晶体定向（与焊接刀杆式单晶刀相同，见图6－19（a））⟶切割成形刀片见图6－21（a）⟶刀片外形减薄并粗磨外圆（见图6－21（b））⟶刀片刃口成形与刃磨（与焊接刀杆式立铣刀相似）。



（a）金刚石刀片切割成形

（b）刀片外形减薄并粗磨外圆

图 6－21　装夹式微型单晶金刚石圆立铣刀

6.3.3.3 球头单晶金刚石圆铣刀设计与工序流程

球头微型单晶刀具制造更困难。球头刀具的刃口是圆弧，可用于铣削曲面类零件。球头刀设计和制造的前期工序与焊接刀杆式圆柱立铣刀相同，后期将刃口后刀面做成圆锥面，设计如图 6－22 所示。

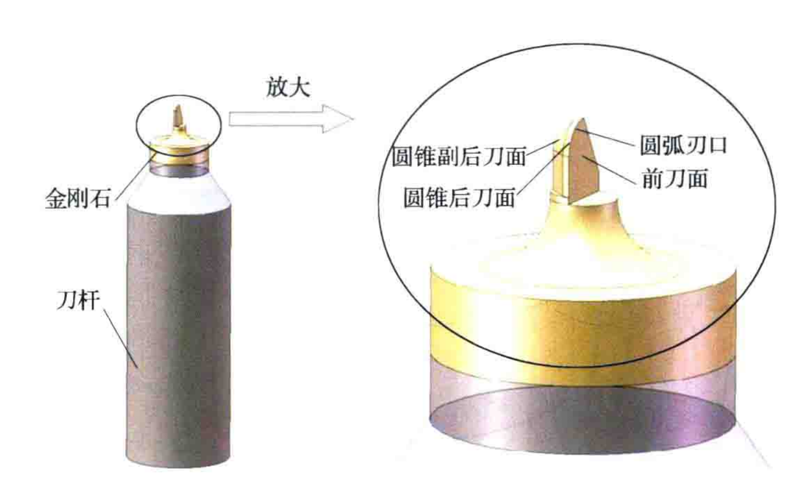
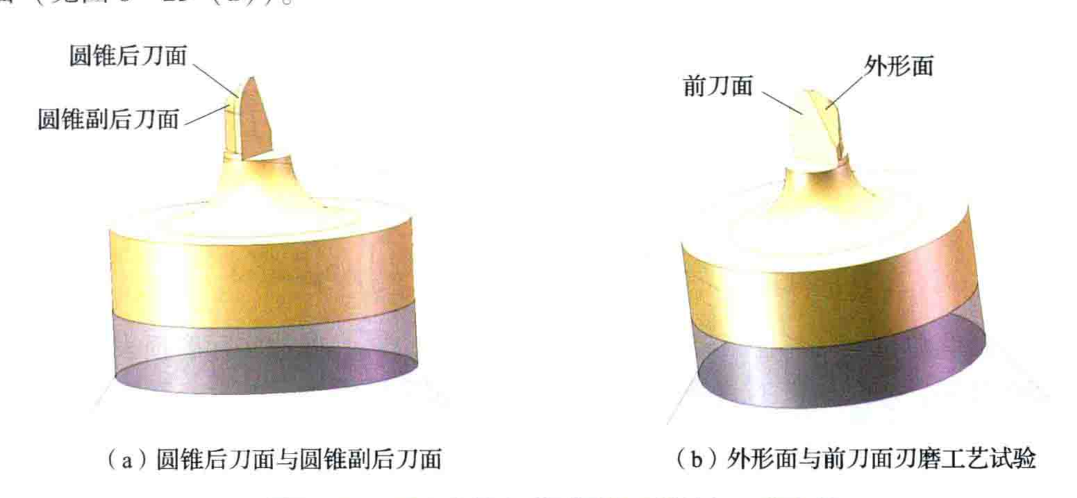


图 6－22　微型单晶球头铣刀

微型单晶球头铣刀设计工序如下：

选材和晶体定向（见图 6－19（a））⟶切割和刀杆焊接（见图 6－19（b））⟶粗磨减径过渡外圆和端刃后刀面（见图 6－19（c））⟶磨削圆锥后刀面，成形圆弧刃口，磨削圆锥副后刀面（见图 6－23（a））⟶切除圆弧刃口的半边外形面，研磨刃口前刀面（见图 6－23（b））。



（a）圆锥后刀面与圆锥副后刀面　　（b）外形面与前刀面刃磨工艺试验

图 6－23　球头单晶金刚石圆铣刀设计与工序流程

6.3.4　微型单晶金刚石刀具刃磨的力学分析

由于微型金刚石刀具直径只有数百微米，在刀具成形及研磨过程中很容易发生断裂破坏，因此对金刚石刀具刃磨设备的精度及磨削工艺有着严格的要求，只有严格控制刃磨力才能保证最终的刀具成品。

（1）微型单晶金刚石立铣刀的磨削力计算

磨削单晶金刚石立铣刀的力可分解为相互垂直的三个分力，即沿金刚石砂轮切向的切向磨削力 F_t，径向的法向磨削力 F_n，以及轴向的轴向磨削力 F_a。其中，法向磨削力 F_n 大于切向磨削力 F_t，而轴向磨削力 F_a 较小，可以忽略，如图 6－24 所示。

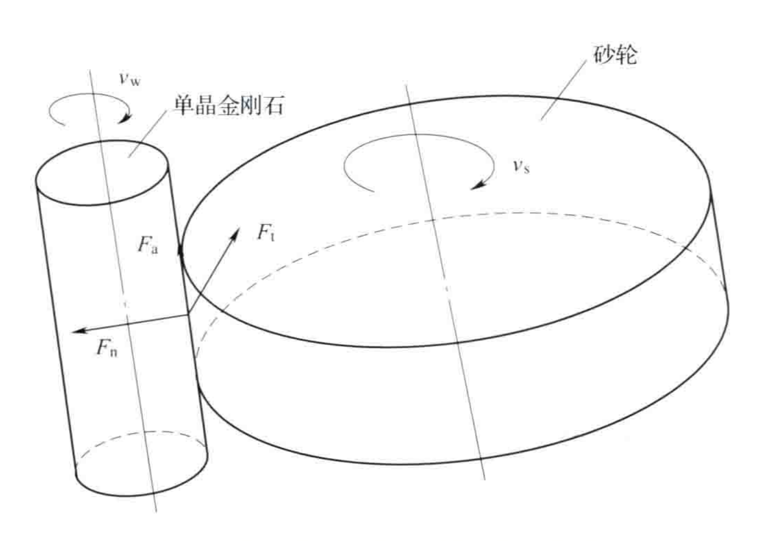


图 6 – 24　单晶金刚石立铣刀的磨削力

磨削力计算公式有三类：一类是根据因式解析法建立的磨削力计算公式，一类是根据实验数据建立的磨削力经验公式，另一类是根据因式解析法和试验研究相结合的方法建立的通用磨削力计算公式。在实际的工程计算中，主要采用经验公式，但由于现有的经验公式均未涉及磨削单晶金刚石的情况，因此在此并不适用。本章使用由 G. 沃纳（G. Werner）建立的磨削力计算公式进行计算。

单位宽度法向磨削力 F'_n，单位宽度切向磨削力 F'_t 为

$$F'_n = F_p\left(\frac{v_w}{v_s}a_p\right) + \frac{\delta\bar{P}A_n}{1+\alpha}(C_e)^{\beta}\left(\frac{v_w}{v_s}\right)^{\alpha}\left(a_p^{\frac{1+\alpha}{2}}d_{se}^{\frac{1-\alpha}{2}}\right) \tag{6-1}$$

$$F'_t = \frac{\pi F_p}{4\tan\theta}\left(\frac{v_w}{v_s}a_p\right) + \frac{\mu\delta PA_n}{1+\alpha}(C_e)^{\beta}\left(\frac{v_w}{v_s}\right)^{\alpha}\left(a_p^{\frac{1+\alpha}{2}}d_{se}^{\frac{1-\alpha}{2}}\right) \tag{6-2}$$

式中，F_p 为单位磨削力，δ 为单颗工作磨粒顶面积，$\bar{P}$ 为磨粒实际磨损表面与工件间的平均接触压强，P 为功率，μ 为摩擦因数，θ 为磨粒半顶锥角，A_n 为与静态磨刃数有关的比例系数，C_e 为磨刃密度，a_p 为磨削深度，v_w 为工件速度，v_s 为砂轮速度，α、β 为与磨削条件有关的指数，d_{se} 为当量砂轮直径。

将刃磨工艺参数代入上述公式，即可计算得到金刚石刀具刃磨时的磨削力。

（2）单晶金刚石立铣刀的有限元建模及静力学分析

建立单晶金刚石立铣刀有限元模型的流程为：建立铣刀实体几何模型，确定材料属性，施加约束条件，输入载荷，划分网格，分析计算，并输出结果。

建立单晶金刚石铣刀实体模型，其中假设金刚石铣刀根部直径为 0.3mm，如图 6 – 25 所示。金刚石微粒焊接于硬质合金刀杆上，因此在分析过程中，对金刚石的焊接端面施以固定约束。为简化计算，使用网格控制，对不影响分析的硬质合金刀杆部分，划分较大单元，而对于金刚石微粒，则划分较小单元。这样不仅能保证仿真计算的分析精度，而且可以降低模型的计算规模。建立的单晶金刚石圆柱立铣刀有限元模型如图 6 – 26 所示。

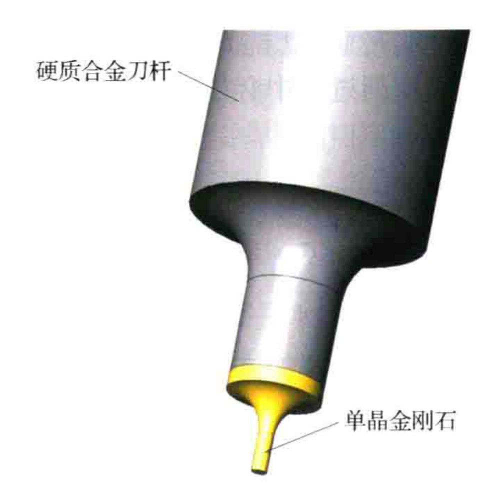


图 6－25　单晶金刚石立铣刀实体模型



图 6－26　单晶金刚石圆柱立铣刀有限元模型

确定材料属性如表 6－1 所示。

表 6－1　单晶金刚石材料属性

材料	密度/(kg/m³)	弹性模量/(N/m²)	泊松比	抗弯强度/MPa
单晶金刚石	3560	10.5×10^{11}	0.2	210

在划分有限元网格后，载荷可根据前面所计算的磨削力施加，并求解计算，最终可得到单晶金刚石圆柱立铣刀在刃磨时的应力云图，如图 6－27 所示。

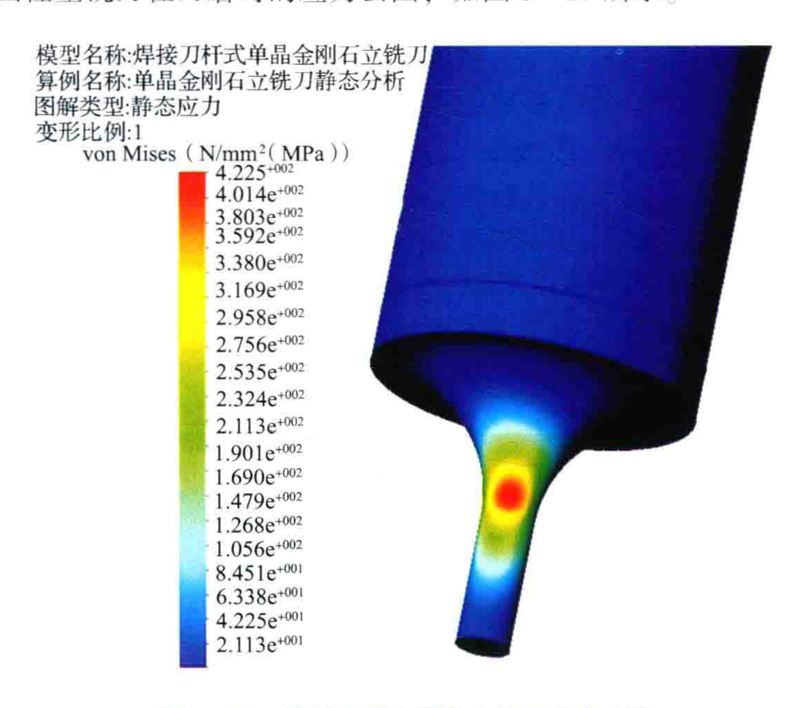


图 6－27　单晶金刚石圆柱立铣刀应力云图

从图 6－27 中可以看出，单晶金刚石立铣刀的应力集中于金刚石圆柱根部。在根部应力集中处，如果金刚石微铣刀的最大应力值大于单晶金刚石的抗弯强度 210MPa，在实际

磨削加工中，金刚石铣刀将在此发生断裂。

假设对模型施加 100gf 力的磨削载荷，单晶金刚石圆柱立铣刀所受的最大应力为 210MPa，也就是说如果需要微铣刀刃磨正常进行，在磨削过程中必须严格控制微铣刀所受的力要小于 100gf。

6.3.5 微型单晶金刚石刀具刃磨工艺

6.3.5.1 刃磨砂轮主轴的动平衡技术

由于单晶金刚石的脆性，单晶金刚石磨削机床对振动控制水平要求很高；微型单晶刀具磨削的首要问题是防止刀具断裂，机床振动是造成刀具断裂的主要原因之一。微型单晶金刚石立铣刀直径要求尽可能小，即使微小的冲击都会使之断裂，所以控制振动是磨削工艺的首要问题。机床的主轴是经过精确动平衡的，振动主要来源于砂轮的动不平衡，所以安装金刚石砂轮后需要对磨头主轴进行精确的在线动平衡。

动平衡方式一般是通过振动传感器及相位传感器在线检测主轴的不平衡量及相位，而后通过在砂轮圆周上特定位置去除一定的材料重量，这种方式可以满足一般单晶金刚石刀具的加工对振动要求。为了解决在单晶金刚石磨床上采用在线动平衡的问题，研制了利用可在环槽内移动的永磁铁块进行动平衡的在线动平衡机构，具有结构简单、可靠，平衡精度高等特点，其工作原理如图 6－28 所示。

在砂轮的背面有环形的槽子，一个永久磁铁吸附在槽子内，靠在环形槽子的外边缘上；高速旋转时的离心力使磁铁块靠在环形槽壁上而不致飞出去。通过振动测量仪监测主轴的振动，改变磁铁快的位置找出振动最小的磁铁块方位，再改变磁铁块的重量，将振动降低至最小。此方法的动平衡精度取决于测振仪器的精度和磁铁块称重的精度。由于是在主轴实际工作转速下进行的动平衡，所以可以实现高转速很高精度的动平衡；通过试验证实了这种方法的有效性，并且这种动平衡过程可以在比较短的时间内完成，完全满足使用要求，平衡效果见图 6－29。

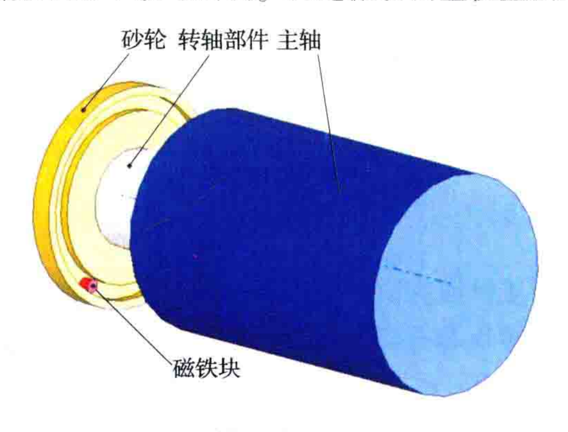
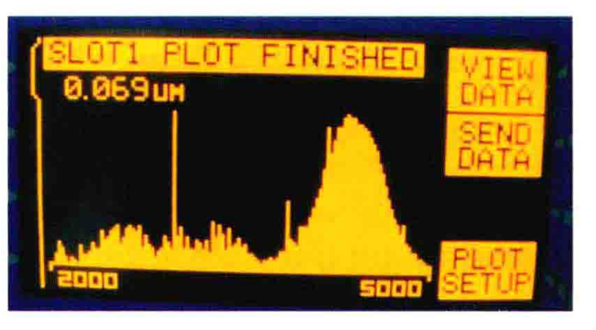


图 6－28　砂轮主轴在线动平衡机构工作原理图



（a）平衡前的振动量测试结果



（b）平衡后的振动量测试结果

图 6－29　动平衡前后振动效果对比

6.3.5.2　焊接刀杆式圆柱立铣刀磨削

准备用于试验的焊接刀杆式圆柱立铣刀毛胚，选择八面体单晶颗粒，晶形完整，浅黄色，透明，材质纯净，20 倍显微镜下无内部缺陷；为了减少余量的去除工作量，选用了比较小颗粒的金刚石晶体；切割并焊接后照片如图 6－30 所示（旁边大头针用于比较尺寸大小）。

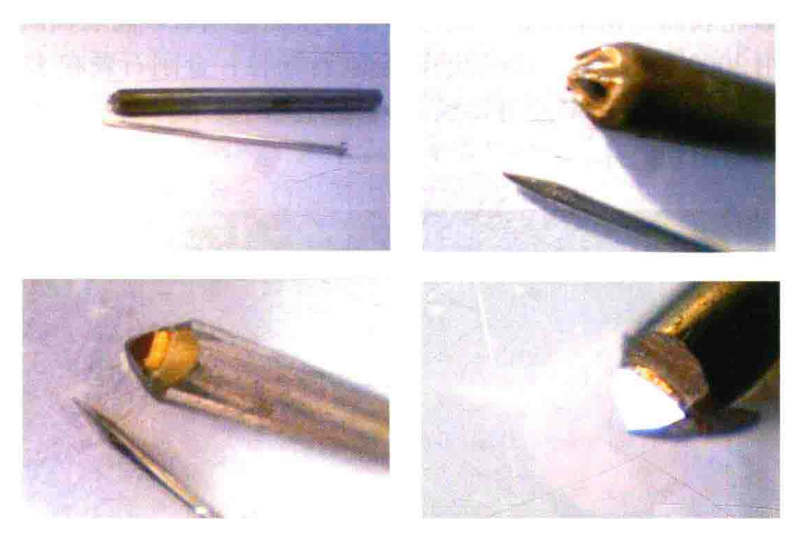


图 6－30　焊接刀杆式圆柱立铣刀毛胚

单晶金刚石的余量去除是十分困难的工作，金刚石磨削不仅要选好晶面，还要选择晶面的磨削方向，到难磨方向时，磨削效率将非常低，甚至根本磨不动；此时就要适当改变磨削方向；金刚石的磨削需要操作者对金刚石的特性非常熟悉，要求操作者有丰富的经验。

制作圆柱立铣刀首先要减小金刚石外圆直径，即滚磨外圆；滚磨外圆时的主要问题是磨削效率问题。选用粒度 500 目的金刚石砂轮，恒力磨削，控制微量进给，用长时间的磨削实现余量的去除。单晶金刚石的磨削加工国内超硬刀具制造厂积累了丰富的经验，技术熟练的操作者可以胜任这项工作。经过一段时间的试验磨削，将金刚石外径减小到 0.8mm 以下，减径滚磨后的焊接刀杆式圆柱立铣刀照片如图 6－31 所示。

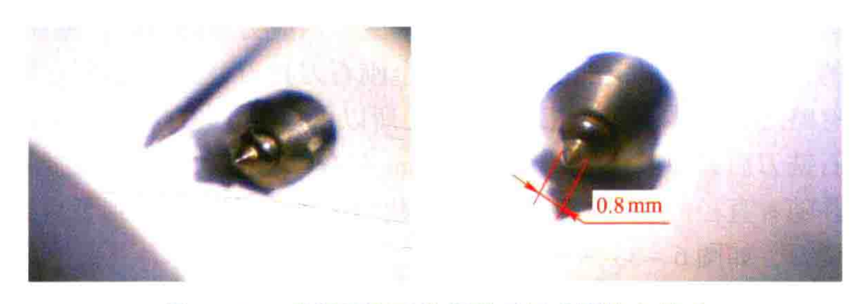
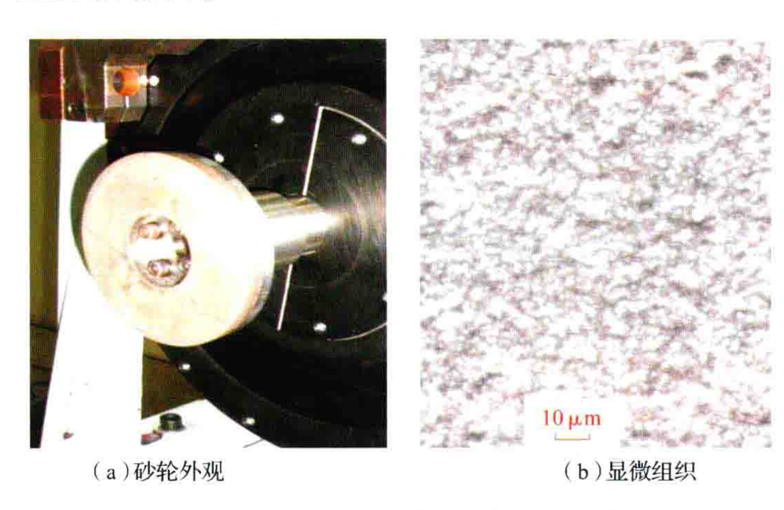


图 6－31　减径滚磨后的焊接刀杆式圆柱立铣刀

之后需要磨削圆柱立铣刀刃口后刀面圆柱，圆柱立铣刀刃口后刀面圆柱直径需要磨削到尽可能小，此时磨削的主要难点是如何保持金刚石不断裂。由于金刚石脆性很大，微小的冲击都会使之断裂；同时，金刚石的高硬度使磨削力较大，磨削力就足以使金刚石断裂。为了实现直径 0.2mm 单晶金刚石圆柱的滚磨加工，需要创造最理想的工作条件，包括砂轮、机床、工艺和操作者的耐心和精心等。

在现有的条件下，对产生金刚石断裂影响最大的因素是机床振动控制和微小恒定磨削

力的控制。机床振动的控制，主要需要对砂轮进行精确的动平衡，我们采用的方法和效果在前面砂轮的选择与动平衡问题中已经阐明。除了机床振动外，对金刚石刀具造成冲击的另一个因素是砂轮表面的跳动。砂轮首先经过平板研磨法修正，达到砂轮表面跳动小于2μm；而后长时间采用金刚石砂轮磨削大颗粒金刚石的方法，使金刚石砂轮与金刚石颗粒相互磨损，实现砂轮表面的精细修正。经过精密修正的金刚石砂轮表面跳动可以达到小于0.5μm。我们采用2000目的金刚石砂轮磨削金刚石颗粒，金刚石颗粒表面可以实现粗糙度小于 *Ra*5nm 的磨削，这种粗糙度可以满足刀具的使用要求。图6-32是采用的金刚石砂轮外观照片和显微组织照片。



(a)砂轮外观　　(b)显微组织

图6-32　金刚石砂轮外观和显微组织

另一个影响金刚石刀具断裂的主要因素是微小恒定磨削力的控制，与其他普通材料不同，单晶金刚石磨削采用的是恒力磨削，即磨削时不论进给量的大小，磨削力是恒定的。通过前面有限元分析结果表明，要保证最小直径0.3mm金刚石铣刀的磨削，必须保证磨削力在100gf以内。最小进给磨削力控制受到机床性能的限制。单晶金刚石磨床进给力控制是采用砝码配重的方式，理论上可以控制到任意小的程度；但实际上，受到机床导轨摩擦力、加力钢丝绳导向滑轮摩擦力和钢丝绳弯曲变形内应力等的影响，施加太小的进给磨削力是不恒定的，不能实现稳定的磨削。由于金刚石刀具刃磨机均采用气体静压导轨，摩擦力几乎可以忽略（详见本书第3章3.6节），所以可以稳定地加载100gf以下的磨削力。

单晶金刚石铣刀后刀面圆柱初始直径0.8mm左右，采用100gf恒定进给磨削力下进行了多次磨削，并随着直径的减小，逐渐减小加载的磨削力，最终得到了直径为0.3mm的单晶金刚石立铣刀，如图6-33所示。

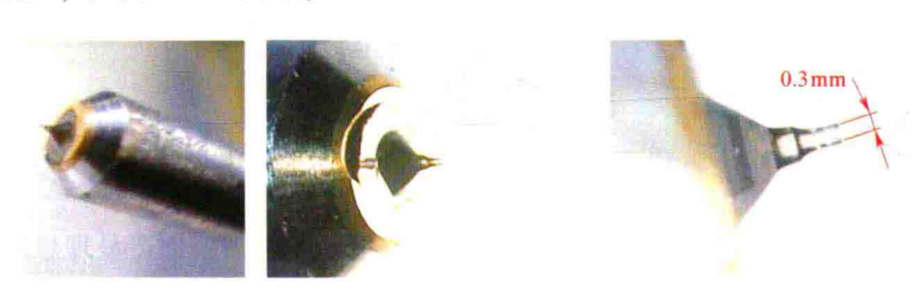


图6-33　磨削到直径0.3mm的单晶金刚石刀具

6.3.6　聚焦离子束加工单晶金刚石刀具

正如上节所描述的，单晶金刚石微型刀具采用机械刃磨法加工时由于受到机械加工磨削力和金刚石强度的影响，刀具的最小尺寸受到限制，我们在磨削试验中也试图将铣刀直径进一步减小，但是如果将直径从0.3mm进一步减小到0.2mm时，磨削过程中多次出现了刀具的断裂。所以随着被加工结构特征尺寸的微型化和形貌的复杂化，对金刚石刀具的刃口锋利度、刃形精度和刀具的耐用度，特别是单晶微型金刚石刀具尺度提出了越来越高的要求，以聚焦离子束为代表的离子束溅蚀法等新兴的刀具加工方法获得了应用，这种工艺可以实现材料的原子量级去除，利用聚焦离子束加工，可以对硬质合金、高速钢、单晶金刚石等多种刀具材料进行显微加工。与精密磨削相比，基于聚焦离子束（Focused Ion Beam，FIB）加工的刀具成形过程没有机械力的作用，刀具在制造过程中不会破损，能够制备出具有极小特征尺寸及纳米级刃口半径的微刀具，具有加工精度高、刀具形貌可控、刃口半径小等优点。聚焦离子束溅射加工的原理如图6－34所示。

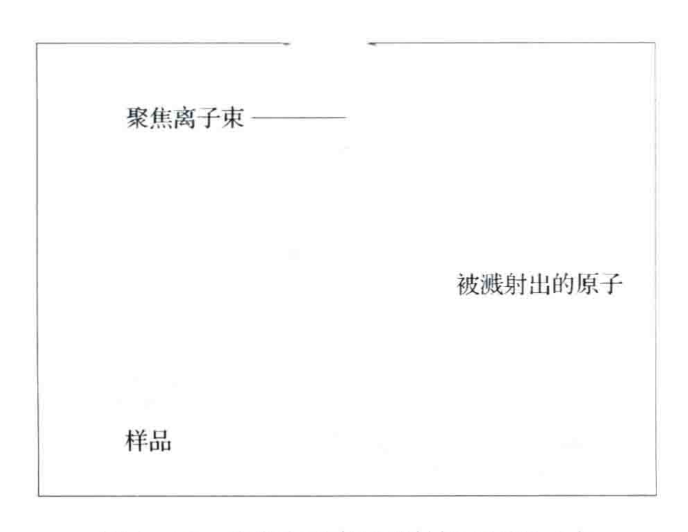


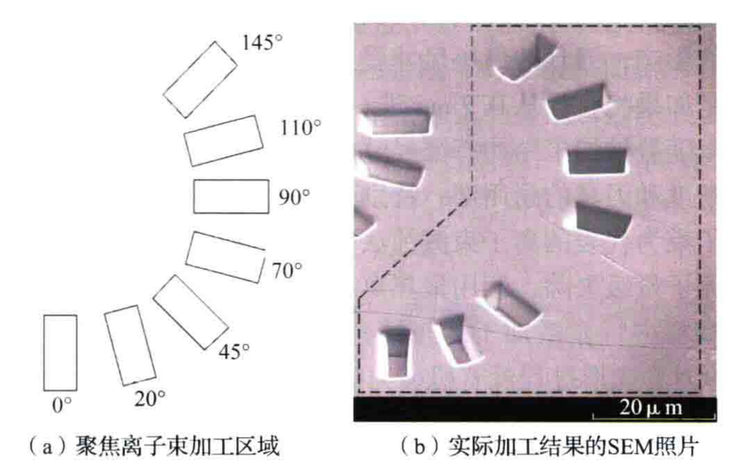
图6－34　聚焦离子束的溅射加工原理示意

离子溅射是聚焦离子束加工中最重要的功能，溅射是入射离子将能量传递给靶材料原子，使这些原子获得足够能量而逃逸出固体表面的现象。离子溅射中，离子束轰击靶材料会产生大量的反弹原子，这些反弹原子会进一步将其能量传递给周围的样品原子，从而形成更多的反弹原子。当其中靠近材料表面的一些反弹原子获得足够动能，挣脱表面的束缚，即成为溅射原子，实现对固体材料的去除加工。

6.3.6.1　金刚石材料的各向异性对聚焦离子束加工的影响

从前面分析可知，机械刃磨法中金刚石晶面和晶向存在难磨和易磨的问题，而对于聚焦离子束专门进行了试验，在金刚石（100）晶面上针对不同晶向进行了聚焦离子束矩形凹槽的加工，加工区域示意和实际加工结果SEM照片如图6－35所示。图6－35（b）中的虚线框内为实际加工的7个区域，按照聚焦离子束加工坐标系分别设定为0°、20°、45°、70°、90°、110°、145°，不仅选取了机械刃磨法中的难磨和易磨方向，还选取了多个中间不同晶向。每个加工区域的尺寸为4μm×10μm，扫描轨迹统一在平行于4μm一侧的方向进行，聚焦离子束加工参数如表6－2所示。通过对不同晶向凹槽的聚焦离子束加

工深度、加工侧壁质量等结果进行对比，开展金刚石材料的各向异性对聚焦离子束加工的影响规律试验研究。



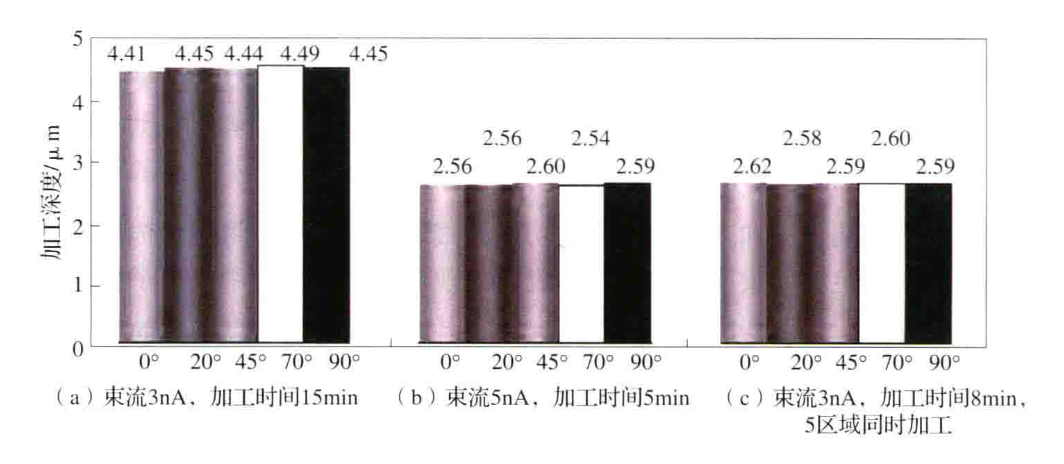
（a）聚焦离子束加工区域　　（b）实际加工结果的SEM照片

图 6－35　聚焦离子束加工区域示意和加工结果 SEM 照片

表 6－2　聚焦离子束的加工参数

加速电压/kV	束流/nA	驻留时间/μs	束流搭接比/%	单个区域加工时间/min
30	3	2	50	15

针对如图 6－35 所示 7 个加工区域，金刚石矩形凹槽的聚焦离子束加工凹槽深度的统计结果如图 6－36（a）所示。通过对比可以发现，凹槽表面质量、加工深度在不同晶面上几乎没有变化，聚焦离子束加工的侧壁和底部均光滑，加工深度波动小于 2%。



（a）束流3nA，加工时间15min　（b）束流5nA，加工时间5min　（c）束流3nA，加工时间8min，5区域同时加工

图 6－36　不同条件下的加工深度图

为了保证加工结果的可靠性，进一步通过改变聚焦离子束加工参数、加工方式来试验并对结果进行统计分析，结果如图 6－36（b）、（c）所示。图 6－36（b）是束流为 5nA 及单个区域加工时间为 5min 的结果，图 6－36（c）是选用 3nA 束流，单个区域加工时间为 8min 及加工方式为 5 个区域同时并联加工的结果。多组结果均表明，聚焦离子束加工金刚石材料的凹槽表面质量、加工深度在不同晶面上几乎没有变化。

通过比较试验结果，可以说明在聚焦离子束加工金刚石材料的过程中，不存在传统机

械刃磨法中的难易刃磨方向的区别。改变聚焦离子束的加工参数或方式并不会使不同晶向上的加工深度及质量出现波动，这个试验结论对于微型单晶金刚石刀具的加工有着重要的意义。

6.3.6.2　基于聚焦离子束加工技术的微型刀具的制备

（1）锋利刃口形成原理

利用 FIB 制备微刀具时，其刃口的形成是通过对两个不同刀面的加工来实现的。由于聚焦离子束的强度分布近似为一个高斯分布，因此，为了使 FIB 在刀面的过程中获得锋锐的刃口，必须满足两个必要的条件：一是聚焦离子束的强度分布是稳定均匀的，从而保证被加工刀面的平滑均匀；二是在进行 FIB 加工时，刀具的切削边缘距离子源的距离相对最远。

如图 6－37 所示为 FIB 加工形成两个锋锐切削刃的原理示意图。FIB 在垂直于刀具轴线且相切于刀具圆周的方向上对刀具毛坯进行加工，被加工的刀面，距离离子源最近的边缘具有圆角，这个倒圆角是由于部分高斯束强度扩展到了被用户定义的加工区域范围外所引起的；而在刀面的另一边，即距离离子源最远的边，则产生了极其锋锐的边缘，这是因为离子束在加工这个边缘时，部分强度被刀面遮挡，因而它的强度呈高斯截短分布。此时，这个锋锐的边缘就可以作为刀具的切削刀刃。将刀具绕轴线旋转 180°，在刀具的另一侧加工第二个刀面，此刀面在垂直轴线的方向上与第一个刀面对称，经过 FIB 加工后，同样产生了一个具有倒圆角的边和一条锋锐的边。

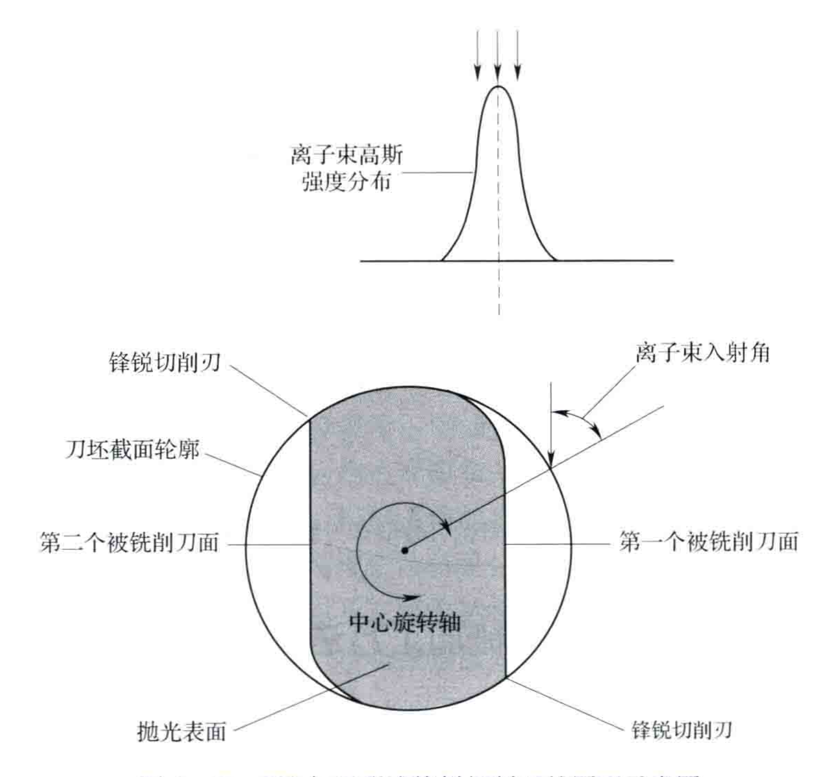


图 6－37　FIB 加工形成锋锐切削刃的原理示意图

通过上述的分析，以聚焦离子束强度呈高斯分布这一重要的基本原理为依据，我们获得了 FIB 加工刀具锋锐刃口的方法。在加工中，通过恰当设置像素间隔与束流直径的比值，并精确定位刀具相对于离子束的位置，就可以获得所需要的锋锐刃口。

（2）微型刀具的制备流程

如图 6－38 所示为 FIB 制备圆弧刃微型车刀的加工步骤示意图。其中，箭头指示了聚焦离子束加工的方向，深色阴影部分表示被 FIB 加工去除的区域。下面以它为例简要地说明 FIB 制备微刀具的基本加工流程。

第 1 步，在刀具毛坯的圆柱面上加工前刀面。在实际加工中，首先需要通过样品台与样品旋转器的结合对刀具进行定位，使离子束的加工方向垂直于刀具的旋转中心轴，且与刀具的刀柄底面平行；然后在毛坯的圆柱面上定义被去除的区域，利用 FIB 加工获得一个表面平滑的前刀面。由于离子束强度的高斯分布，被加工的前刀面将不会与离子束的铣削方向平行，而是呈一个很小的角度，设此角度为 θ。这里加工的前角为 0°，也可根据实际要求通过设置输入的加工图形来获得所需的前角。

第 2 步，加工刀具的两个侧刀面。将刀具毛坯顺时针旋转 90°（以从刀具末端沿刀具旋转轴的方向为参照），使离子束在前刀面背对的圆柱面上进行加工。将刀具的柱体两侧的部分对称地去除，被加工的两个相对的平面作为刀具的侧刀面。此步骤确定了刀具横截面的宽度，并获得了两个锋锐的切削边缘。

第 3 步，加工刀具的后刀面并获得恰当的后角。首先调整聚焦离子束的入射角 ϕ，即离子束入射方向与刀柄背面的法线方向之间的夹角。根据设计的后角来确定离子束的入射角，设所需的后角为 α_0，则 $\phi = \alpha_0 - \theta$；刀具的背面相对离子束的位置确定后，根据所需的刀具横截面形状向系统输入相应的加工图形，这里加工的形状是圆弧形，可输入预先设计好的灰度图形文件；最后，经 FIB 加工后获得了具有一定后角的后刀面，同时产生了锋锐的圆弧刃。



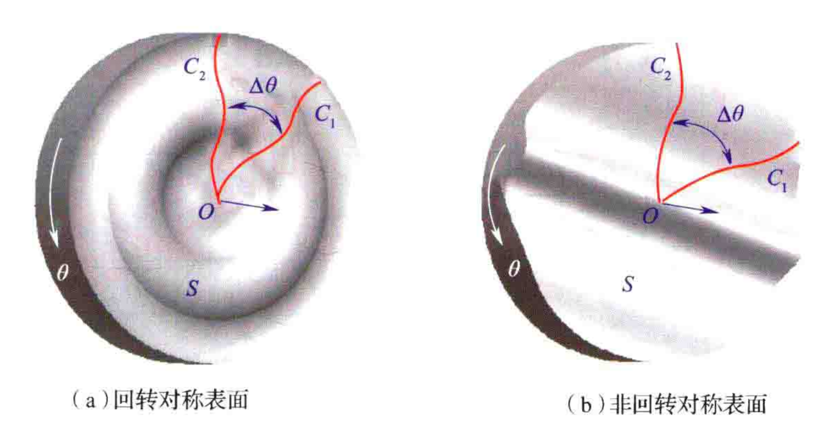
图 6－38　FIB 制备圆弧刃微型车刀的加工步骤示意图

6.4　微结构特征的超精密机械加工方法及工艺

6.4.1　非回转对称微结构表面超精密车削加工关键技术

根据车削加工表面成形原理的差异，可将表面分为回转对称表面和非回转对称表面。回转对称表面是指可以由母线绕轴线旋转生成的表面，如图 6－39（a）所示，其中 C_1 和 C_2 为不同转角处过轴线的截面轮廓，它们是完全相同的。车削加工回转对称表面时，不需要考虑主轴转动的角度，通过两个直线运动坐标插补即可得到，如球面、非球面、抛物

面等。非回转对称表面是指不能由母线绕轴线旋转得到的表面，如图 6－39（b）所示，不同转角处过轴线的两条截面轮廓 C_1 和 C_2 的形状是不同的。



（a）回转对称表面　（b）非回转对称表面

图 6－39　金刚石车削加工表面的分类

加工非回转对称表面时不仅需要考虑直线运动坐标轴的位置，还要考虑主轴转动的角度，如正弦网格表面和微透镜阵列等。而非回转对称微结构表面在太阳能发电、光学成像、照明、精密测量、激光加工等领域中得到了越来越广泛的应用，而此类表面的超精密加工技术已经成为 21 世纪先进制造技术中的一项关键技术。

实现非回转对称微结构表面超精密车削加工所需要的关键技术主要有：加工设备（包括带有 C 轴功能的超精密金刚石车床、快速伺服刀具）；金刚石刀具技术；车削加工轨迹生成技术（包括刀具的轨迹计算、刀尖圆弧半径补偿、特定方向上的刀尖圆弧半径补偿）；超精密表面测量技术；非回转对称表面形状误差评价技术；非回转对称车削加工仿真技术；形状误差补偿技术等。关于超精密加工设备及刀具技术在本书其他章节已有所涉及，本节重点介绍刀具轨迹生成、表面形状误差评价和加工仿真技术等。

6.4.1.1　刀具轨迹生成技术

刀具轨迹生成是实现非回转对称微结构表面车削加工的基础。目前，采用超精密车削加工的典型非回转对称表面有正弦网格表面、微透镜阵列、正弦波表面等，但是这些加工的结构可以用一个简单的数学公式进行表示，例如正弦波、正弦网格表面就可以直接用正弦或余弦函数进行表示。微透镜阵列为四边形排布球面微透镜阵列，阵列中的每个微透镜也都可以用一个简单的方程进行描述。根据透镜的排布规律，采用搜索的方法来计算车削加工此表面时刀具轨迹点的坐标。所谓搜索法就是依次计算刀尖点到每个透镜中心点的距离来判断刀尖点是否在透镜表面上，以及在哪个透镜表面上。进而根据透镜的描述公式来计算坐标值并进行刀尖圆弧半径补偿，但是搜索法效率很低尤其是对于表面上有许多个透镜的阵列。

非回转对称车削时必须考虑主轴的转角，这是与传统回转对称表面车削加工刀具轨迹计算原理的最大不同之处。因此，实现非回转对称复杂表面车削加工，需要机床既要有足够的精度、良好的动态性能，还要求主轴具有角度控制功能。非回转对称车削加工表面成形原理如图 6－40 所示，其中，工件装夹于机床主轴（C 轴）上，X 向进给由工作台来完成，刀具的 Z 向进给量则根据主轴的转角、X 工作台的位移及所要加工的表面形状参数计

算得到，进而采用快速伺服刀架或 Z 向工作台实现相应的进给。根据非回转对称车削加工表面成形原理得到刀尖轨迹点的基本算法，如图 6－41 所示。

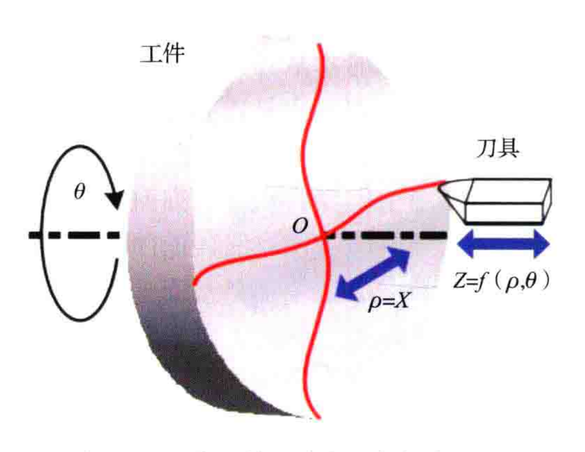


图 6－40　非回转对称表面车削成形原理

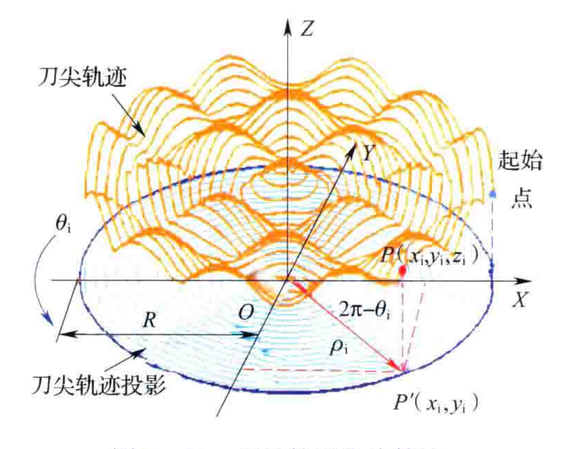
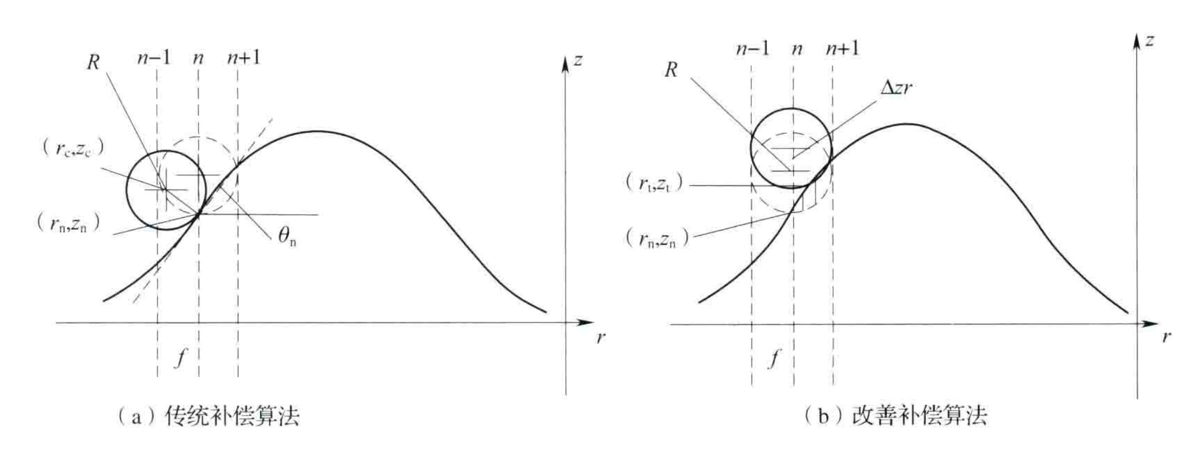


图 6－41　刀具轨迹生成算法

设 $P(x_i, y_i, z_i)$ 为表面上的任意一点，其 Z 坐标可表示成 X 坐标和 Y 坐标的函数：$z_i=f(x_i, y_i)$，而点 P 在 $X-Y$ 平面上投影 $P'(x_i, y_i)$ 的坐标又可表示为：$x_i=\rho_i\cos\theta_i$，$y_i=\rho_i\sin\theta_i$。带入表面方程可得 P 的 Z 坐标为：$z_i=f(\rho_i\cos\theta_i, \rho_i\sin\theta_i)$，其中 ρ_i 为刀具到工件旋转中心的距离，θ_i 为工件转过的角度，它们分别与 X 向工作台到旋转中心的距离和主轴的转角相对应。当 X 向工作台进给速度与主轴转速恒定时，无论加工的表面形状多么复杂，刀尖轨迹在 $X-Y$ 平面上的投影都为等距螺旋线。刀具轨迹生成算法的核心就是：计算不同表面形式时上述螺旋线上每个点所对应的 Z 坐标值。

随着技术的进步，尤其是在光学设计和应用领域越来越多的设计得到的表面只能用一些离散的点进行描述（赋值曲面），如何实现此类表面的车削加工已经成为了重要的研究课题。德国亚琛大学采用 NURBS 对离散的点进行了拟合，然后根据计算直角坐标系下的刀具点 $P(x, y)$ 的 X、Y 坐标计算对应的 NURBS 表面上的 Z 坐标值生成刀具轨迹。为了得到刀具轨迹需要，首先求得点 P 的直角坐标对应的参数坐标，然后再将得到的参数坐标带入 NURBS 表面方程得到点 P 的 Z 坐标。

车削加工非回转对称超精密表面时，通常采用圆弧刃金刚石刀具，因此需要对刀尖圆弧半径进行补偿。一般刀尖圆弧半径补偿方法是通过求切削点处的法向量，根据法向量得到当前切削点的等距点。当刀尖圆弧中心与此等距点重合时，刀尖圆弧轮廓与所要加工的轮廓相切，如图 6－42（a）所示。上述方法计算得到的补偿量既有 Z 向分量，又有工件半径 r 方向上的分量。半径方向上的分量与 X 向工作台的运动相对应，当加工表面形状复杂时，具有较大运动质量的 X 向工作台也需要高频往复运动，这对加工十分不利。改进的刀尖圆弧半径补偿算法，只沿着 Z 方向进行补偿，并通过黄金分割法求取沿 Z 方向补偿量的大小，如图 6－42（b）所示。但是黄金分割法对于每个点需要多次迭代才能收敛到要求的精度，算法效率较低。由图中可以看出，在刀尖圆弧半径补偿时，需计算刀尖圆弧所在基面与加工表面的交线轮廓。求 NURBS 等参数方程与基面的交线方程，计算过程十分繁琐，也非常耗费时间。因此，对于离散点描述的表面，如何进行简洁、高效、高精度的刀具轨迹计算，并仅在 Z 向对刀尖圆弧半径进行补偿仍需进一步探讨。



（a）传统补偿算法　　（b）改善补偿算法

图 6－42　车削加工刀尖圆弧半径补偿算法

6.4.1.2　形状误差评价技术

形状误差评价包括两个方面：轮廓误差评价和面形误差评价。面形误差评价可以全面、准确地反映出所加工的曲面误差的大小和误差分布情况，但是求取算法复杂、计算量大。曲面特定轮廓的误差虽然只能在一定程度上反映曲面的加工精度情况，但是其算法相对简单、计算量小。

形状误差评价的核心为匹配问题，对于轮廓误差来讲是测量轮廓与设计轮廓的匹配，对于面形误差来讲是测量曲面与设计曲面的匹配。传统的轮廓误差评价所涉及到的轮廓通常是一些简单的轮廓，如直线、圆、椭圆等可以用简单方程进行描述的轮廓。而有些超精密轮廓，只给出了轮廓上的一些离散的点，此时传统的轮廓误差评价方法就不再适用。

轮廓误差评价步骤如图 6－43 所示，整个过程主要包括粗匹配和精匹配两个步骤。对于测量得到的轮廓，其上面可能存在高频误差成分。求曲线的曲率时需要求曲线的二阶导数，这些高频误差成分可能会导致所求得的曲率曲线上出现许多奇异点，给粗匹配带来问题。因此，采用低通高斯滤波将此高频成分分离出去。分别对测量曲线和设计曲线进行弧长曲率参数化后，采用互相关方法实现两条弧长曲率曲线的匹配，从而就可以在设计曲线和测量曲线上找到相对应的点对作为特征点对，根据这些特征点对计算粗匹配平移、旋转参数的大小。在粗匹配的基础上采用迭代法计算测量曲线上的点到理论曲线的距离，建立轮廓精确匹配模型，并采用遗传算法实现测量轮廓与理论轮廓精确匹配模型的求解，精确匹配后测量点到理论曲线的距离即为此处的轮廓误差。

对于具有周期性特征的表面，可通过分析某一截面轮廓的误差来对整个表面加工精度进行初步估计，例如一个过透镜阵列顶点的轮廓可在一定程度上反映整个阵列的加工精度。但是，其所评定的部分毕竟只是三维表面中的一条特定轮廓，不能完全代表整个表面的形状精度。为得到更加完整的表面评价结果，需要对曲面面形误差进行评价。面形误差评价结果不仅可以更加准确、全面的反映工件的精度情况，并且还对分析误差的来源、误差对工件性能的影响等提供帮助。曲面误差评价所要解决的也是测量坐标系与设计坐标系不统一带来的匹配问题。为了得到面形误差，需要对测量曲面进行旋转、平移变换，使其与设计曲面匹配到一块。

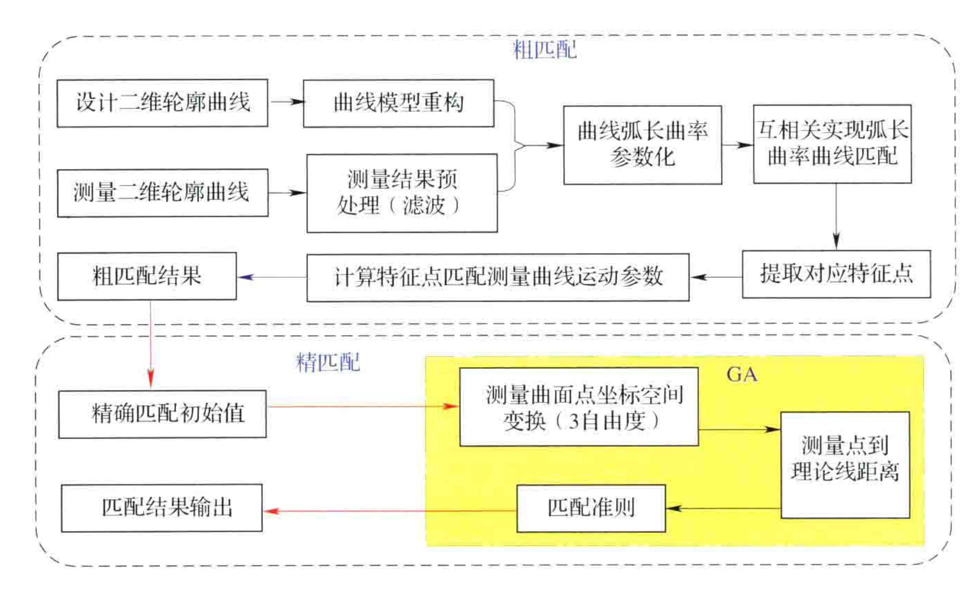


图 6－43　轮廓误差评价系统框图

面形误差评价比轮廓误差评价更加复杂，为了更清楚地对其进行说明，先给出面形误差评价系统的整体结构框图，如图 6－44 所示。整个评价系统分为粗匹配和精匹配两大部分，其中粗匹配的目的是为精匹配提供一个较好的初始值，精匹配使得测量曲面与设计曲面满足均方距离最小准则。粗匹配时需分别得到测量与设计曲面的三维数据，当设计曲面为离散点表示时，需要对其进行拟合从而得到曲面的数学方程。对于测量曲面，加工、测量中都会引入一些高频的误差成分，这些高频成分会导致曲率曲面上奇异点的出现，不利于特征点的提取。为此需要对测量曲面进行高斯滤波处理，去除掉高频的粗糙度成分，使计算得到的曲率曲面更加光滑。在粗匹配计算特征点时，将曲面上的曲率极值点作为匹配的特征。粗匹配是求解测量曲面在空间 6 个自由度变换时，特征点对均方距离最小；而精匹配是求解测量曲面上点到设计曲面均方距离最小。粗、精匹配都可归纳为最优化问题。尤其是精匹配，其求解域内存在许多局部极小值，通常的求解方法很容易陷入极小值，而导致求解结果不可靠，而遗传算法是一种比较适合的求解方法。

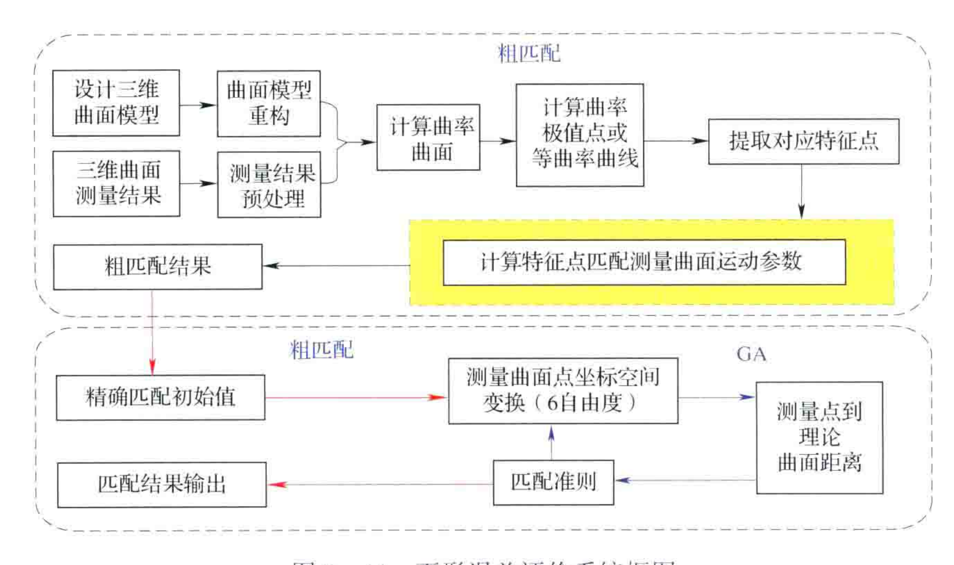


图 6－44　面形误差评价系统框图

6.4.1.3 加工仿真技术

回转对称表面超精密车削加工时，工件的表面质量受到主轴转速、工作台进给速度、刀具参数等诸多因素的影响，单靠加工人员的经验已经难以保证一次加工得到的结果能够满足设计要求。而非回转对称车削技术在实现复杂表面加工的同时，也带来了更多的问题。

①随着表面复杂程度的增加，加工程序也随之变得非常复杂，程序中的错误就可能导致加工时刀具与工件发生碰撞，损坏设备，这就需要在加工之前验证程序的正确性。

②加工过程中，机床某些部件需要根据所加工表面的形状高频往复运动，其动态特性影响着加工表面的表面粗糙度和形状精度，这就需要预测运动部件的动态特性对加工结果的影响。

③刀尖圆弧半径补偿算法也是影响超精密微结构表面车削加工的一个关键因素，需要在加工之前对其进行验证。

④金刚石刀具与工件旋转中心的对心误差也会影响加工结果，加工前就需要分析对心误差引起的面形误差是否在要求的范围之内。

为解决上述问题、保证加工质量、提高加工效率，需要建立一个与真实加工系统相对应的仿真系统，并根据建立的仿真系统来分析影响加工结果的主要因素，从而为实际加工提供指导。

仿真系统结构如图6-45所示，主要包括动态切削力模型、控制系统模型、简化的动力学模型，机床运动学模型以及加工形貌生成模型。其中，运动控制系统模型也由四部分组成：主轴控制系统、X向工作台控制系统、Z向工作台控制系统和FTS控制系统。实际加工过程中还有许多其他因素影响工件的加工形貌，例如金刚石刀具几何形状、工件的材料特性、加工参数、外部环境等。为了较好的预测加工结果，仿真模型需要尽可能准确的包含上述所有因素。

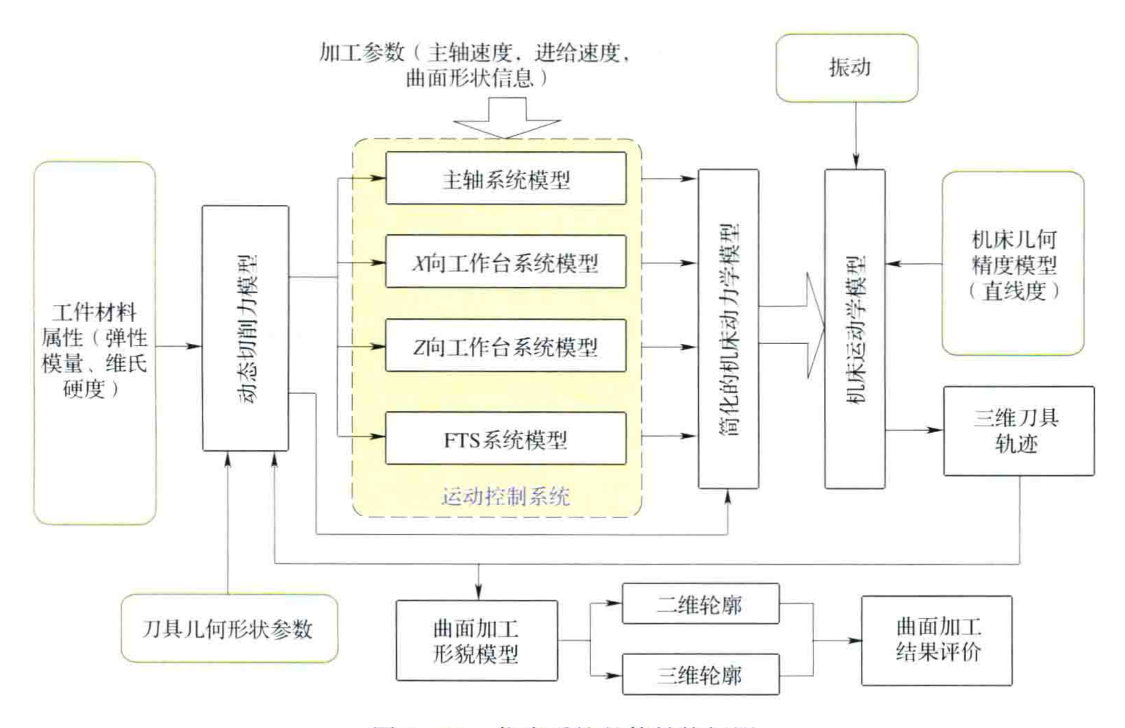


图6-45 仿真系统整体结构框图

理想情况下，超精密机床每个部件的实际运动应该与 UMAC 运动控制器的指令完全相同。然而，由于控制系统的动态特性，机床主轴，X、Z 向工作台和 FTS 的实际运动位置跟指令位置并不是完全相同的。上述各个部件的运动误差以及每个部件在其空间各坐标方向的振动都会影响最终的刀具轨迹，使实际的刀具切削轨迹与理想轨迹之间存在差异。尤其是 FTS，它在加工过程中通常需要在切深方向高频往复运动，其动态特性将会对加工结果产生重要影响。切削力也会影响到机床控制系统（主轴控制系统、导轨控制系统、FTS 控制系统）的动态特性。因此，每个运动部件的控制系统需要按照真实的机床控制系统来建模，并将切削力看做干扰因素。切削力还会引起机床机械系统的振动，同时机床本身的性能和机床本身的振动（例如环境振动、主轴的跳动等）也应该被考虑进机床仿真模型。机床每个部分的运动都会影响刀具三维轨迹，上述所有模型的组合即为非回转对称复杂表面加工仿真系统。

表面三维形貌模型用来根据刀尖三维轨迹和刀尖的几何形状生成加工结果的三维表面，进而得到仿真表面的形状误差、表面粗糙度等参数。

6.4.2 典型微结构特征超精密车削加工工艺试验

6.4.2.1 正弦网格表面非回转对称微结构表面的加工

正弦网格曲面的数学方程是：

$$Z = A_x \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_x}x\right) + A_y \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_y}y\right) + Z_0 \tag{6-3}$$

式中：A_x——X 向的正弦波的幅值，μm；

A_y——Y 向的正弦波的幅值，μm；

λ_x——X 向正弦波的波长，μm；

λ_y——Y 向正弦波的波长，μm；

Z_0——为了保证可以实现切削所需的最小切削厚度所需要的常量，若没有这个常数，在正弦网格的波峰附近的切削厚度非常小，影响表面加工质量。

图 6－46 是正弦网格加工程序的流程图，加工前要先设置 I 变量等参数，程序本身是一个循环体，每次循环对应一个数据点。执行程序的时候，PMAC 预先计算各个点的坐标值，并进行三次样条插值，控制刀架的运动，直到程序设定的终结点。

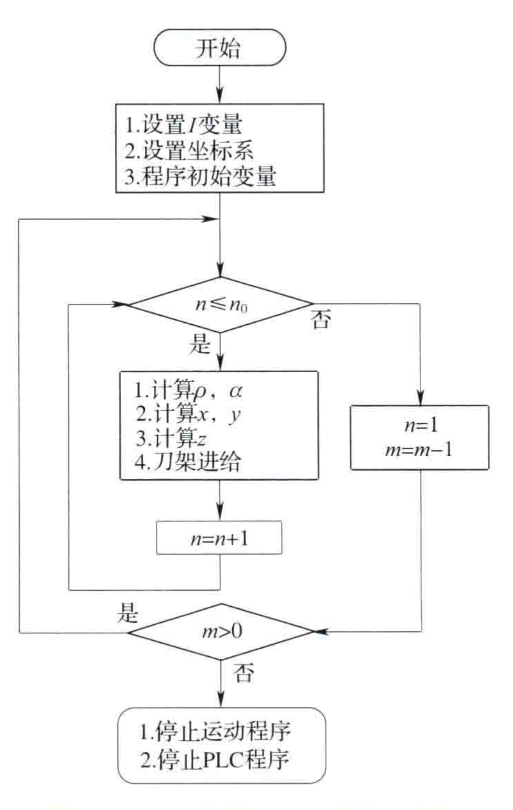


图 6－46 正弦网格加工程序流程图

表面加工程序的实现方式如下：设定 X 轴的进给速度为 V_x（μm/s），在半径范围为 r_0（μm）上进行加工，主轴的转速为 w（r/min），在每一圈上选取的采样点数为 n。那么加工所需要的时间为：$t = r_0/V_x$；加工正弦波主轴总共转过的圈数为：$m = t \cdot w$。在 X 轴匀速进给的情况下，每一个点

对应的 X 走过的距离为 $\Delta r = r_0/(mn)$。每一个点对应的主轴转过的角度为：$\Delta\alpha = 2\pi/m$。这样就可以得到每个点所对应的半径值 ρ 和与初始方向的角度值 α。这个点在平面上的坐标就可以表示为：$x = -\rho\cos\alpha$，$y = \sin\alpha$。Z 坐标就可以用式（6－3）求得。

图 6－47 为正弦网格表面加工工件及表面三维形貌图。

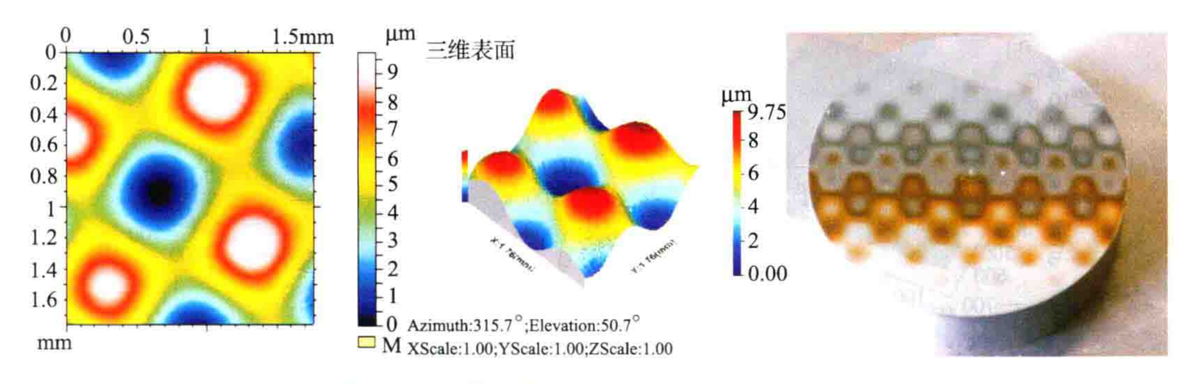
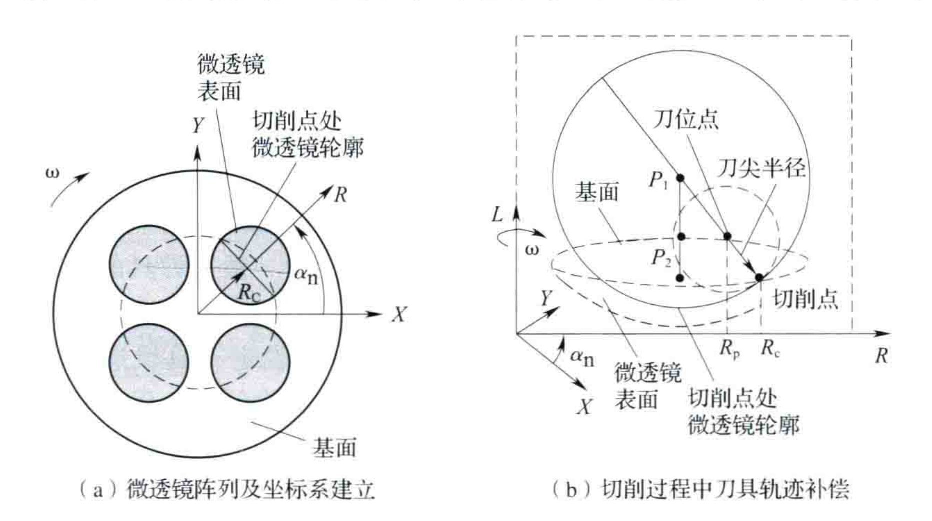


图 6－47　正弦网格表面三维表面形貌及工件

6.4.2.2　微透镜阵列的超精密加工

微透镜阵列是指微小透镜（尺寸从 10μm 到 1mm 之间）按一定式样排列组成透镜阵列，目前广泛用在光机电产品的导光系统，如手机、平板计算机、LED 电视等显示器上的导光板。采用微透镜阵列，可实现用少数几个点光源（如 LED 灯）均匀照亮整个屏幕，使得显示设备结构轻薄紧凑，同时也满足更好的光学效果。在批量生产中，通常采用超精密加工微透镜阵列模芯，然后通过精密注塑获得微透镜阵列产品。

微透镜阵列可通过快刀伺服辅助超精密金刚石车削来加工，金刚石刀具通常采用尖刀，刀尖半径需要依据所加工的微透镜最小曲率半径来确定。在微透镜阵列加工中，需要对尖刀半径进行补偿，生成刀具轨迹。图 6－48 所示为快刀伺服加工微透镜阵列刀具轨迹补偿及生成算法，通过切削点位置反算到刀位点，从而生成数控刀具轨迹代码。

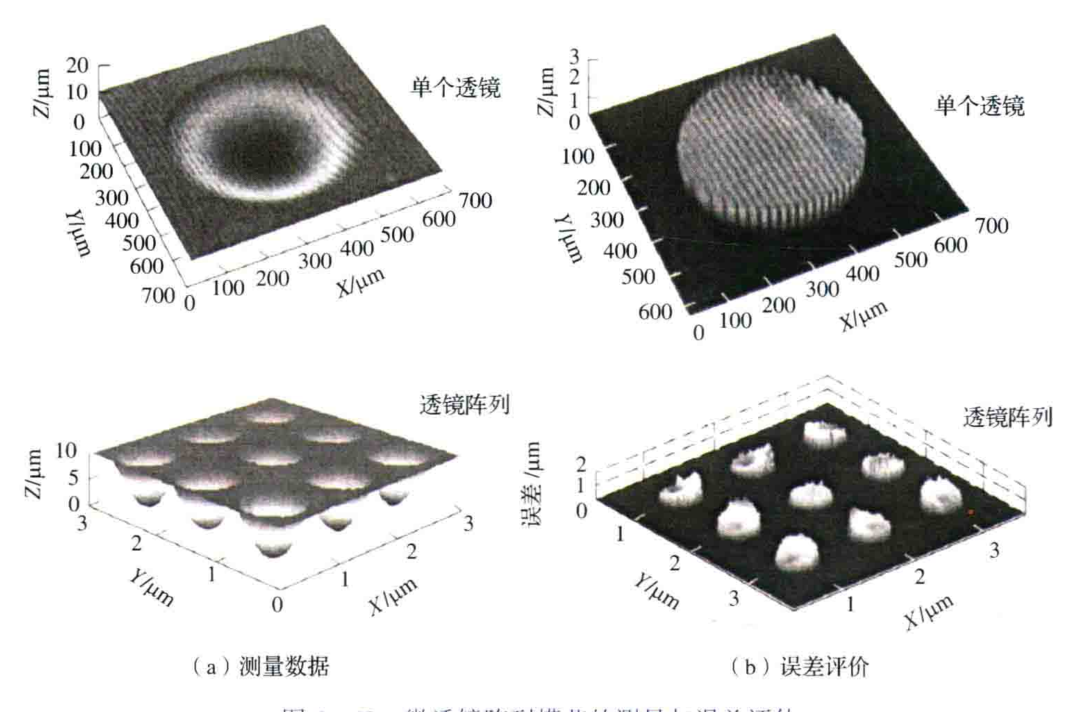


（a）微透镜阵列及坐标系建立　　（b）切削过程中刀具轨迹补偿

图 6－48　FTS 加工微透镜阵列刀具轨迹补偿及生成算法示意图

加工的微透镜阵列模芯通过非接触式三维光学干涉系统测量，然后采用微结构曲面评定算法，进行单个微透镜的面形评估，以及微透镜阵列的整体面形评估。图 6－49（a）

所示为微透镜阵列的测量数据，图 6 - 49（b）为微透镜阵列的面形评估结果。由图中可见，单个微透镜的评估结果显示了刀具的切削痕迹，而微透镜阵列的误差分布，呈现了中心对称的规律，并且距离回转中心越远，误差越大。这些误差分布规律有助于对加工过程中的误差源进行分析诊断，从而采取对应补偿或改善措施，提高加工质量。



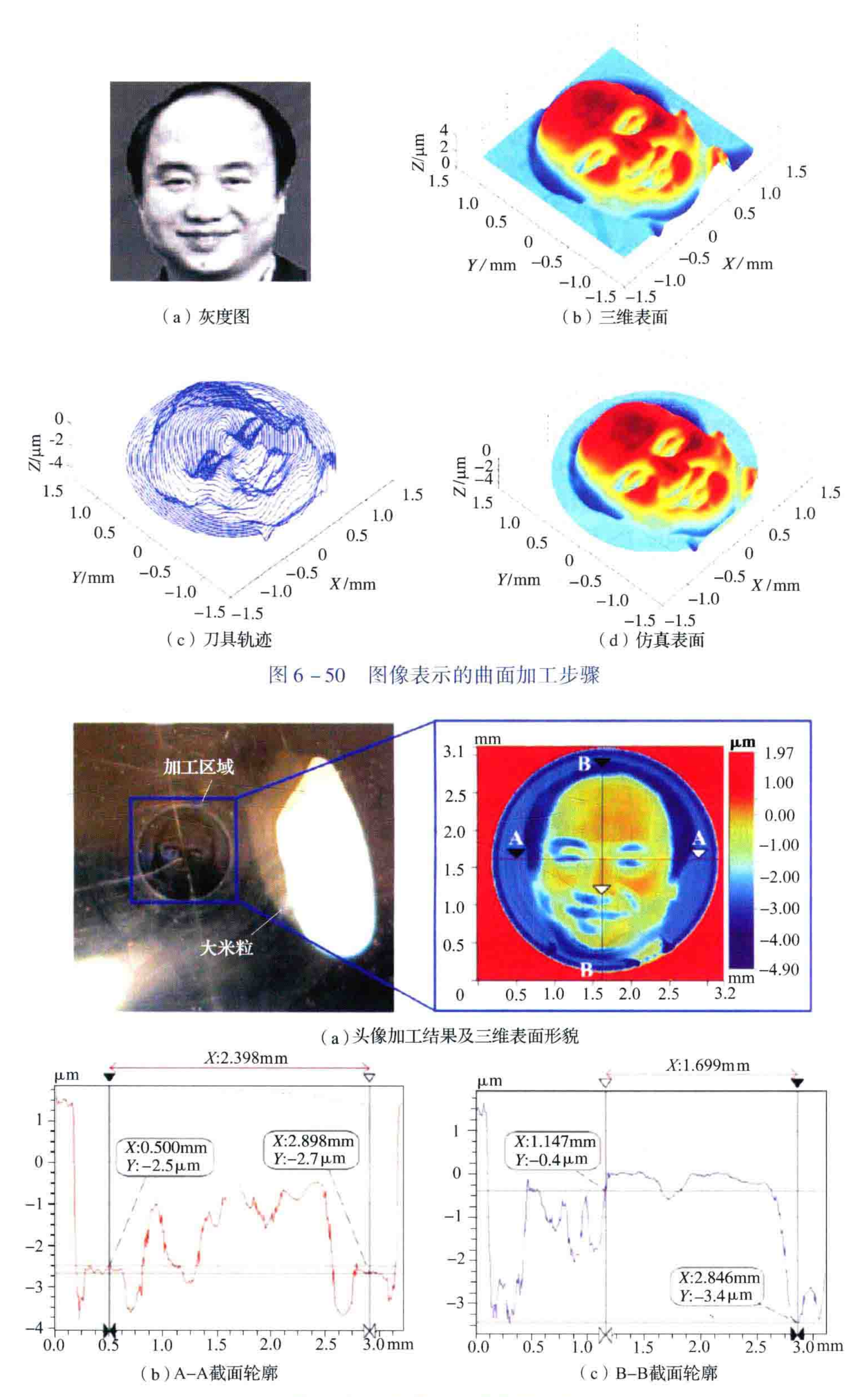
（a）测量数据　　（b）误差评价

图 6 - 49　微透镜阵列模芯的测量与误差评估

6.4.2.3　离散点描述微结构表面加工试验

拟采用 STS 方法车削加工一个用灰度图片表示的头像，如图 6 - 50（a）所示。为实现此图片的加工需要将其转换为三维数据，即将图片上每个像素点的灰度值转换成一个高度值，设定图像上每个像素点 X、Y 方向上的大小为 20μm。在对图像的 X、Y、Z 尺度进行变换后，还需要将工件的旋转中心设定于图像的中心位置，这就需要在上述尺度变换的基础之上对三维头像数据做平移变换，最终得到的灰度图像在直角坐标系中的三维形貌，如图 6 - 50（b）所示。由灰度图得到的三维形貌的最高值为 3.785μm，最低位置为 0.061μm，PV 值为 3.724μm。加工时，将上述三维形貌沿 Z 轴负方向进行平移 4.15μm 使其位于工件材料基平面的下方。根据刀具的选用原则（详见第 4 章 4.4 节）选取加工时满足不发生干涉的条件。而后根据所述刀具轨迹生成算法计算加工上述表面的刀具轨迹，如图 6 - 50（c）所示。设定刀具轨迹生成区域的半径为 1.4mm，加工刀具进给速度 6μm/r，此时即可完全包括全部的面部形貌。图 6 - 50（d）为采用此参数得到的曲面三维仿真图，可以看出采用上述刀具轨迹可以得到期望的三维头像。

图 6 - 51 为头像的加工及测量结果，由图 6 - 51（a）中对加工区域的三维曲面测量结果可以看出：得到了与设计图形完全相同的头像形貌。图 6 - 51（a）、（b）为在测量曲面上选取的两个截面轮廓，这两个轮廓更加直观的表明了所加工图形的高低起伏特征，证明了加工结果的正确性。



（a）灰度图

（b）三维表面

（c）刀具轨迹

（d）仿真表面

图 6－50　图像表示的曲面加工步骤

（a）头像加工结果及三维表面形貌

（b）A−A截面轮廓

（c）B−B截面轮廓

图 6－51　头像加工及测量结果

6.4.3 微结构特征的超精密磨削加工

6.4.3.1 超精密磨削在微结构制造中的应用

受应用需求的驱动，近十几年来，面向于微结构光学功能元件的高精度、大批量、低成本的加工技术需求越来越大。大量的试验研究发现，复制加工技术加工精度高，并且能够提高光学功能元件的机械及化学性能。同时复制加工技术可极大地降低加工成本，缩短生产周期，实现集成化大批量生产，是微结构光学元件大批量、低成本制造最具潜力的加工技术。但是在微结构光学元件的复制过程中，具有微结构表面模具的超精密加工质量对最终的产品性能和成本控制起着决定性的作用。随着被复制元件光学性能要求以及模压温度的不断提高，其模具材料正在向碳化硅、碳化钨和氮化硅等具有高硬度、耐高温、耐磨损、化学稳定性好等特征的超硬材料发展，借此提高模具的使用寿命和精度长期一致性。因此，研究开发针对微结构光学功能元件模具的高效率超精密加工方法将是未来微结构光学功能元件实现确定性、经济性与柔性大批量生产的关键。

超精密磨削是一种亚微米级的加工方法，并正向纳米级发展。它是指加工精度达到或高于0.1μm、表面粗糙度 *Ra* 低于0.025μm 的砂轮磨削方法，特别适于硬质合金及陶瓷等超硬材料模具的加工。作为一种理想的模具材料加工方法，超精密磨削加工技术在微结构光学功能元件模具制造领域受到了极大的重视，已成功应用于衍射光学元件、多棱镜、微透镜阵列、金字塔微结构、蛾眼减反射光栅等微结构的加工。

德国不来梅大学的精密加工实验室（LFM）与德国亚琛技术大学、美国俄克拉荷马州立大学从2002年开始合作进行一项跨区域合作研究项目“复杂光学元件的制造工艺链集成技术（SFB/TR4）”。在此项目的资助下LFM使用金属基金刚石砂轮通过缓进给仿形磨削的方法在碳化钨上加工出了半径为1.123mm ±0.0125mm 的圆柱槽阵列微结构（共21个槽），磨削后的微槽表面粗糙度 *Ra* 在33nm 到40nm 之间，如图6－52 所示。另外LFM还在氮化硅上加工出了半径为0.7437mm、槽宽450μm、槽深31μm 的圆柱槽阵列微结构，并进行玻璃模压试验，如图6－53 所示。通过大量的微结构表面磨削试验研究，LFM指

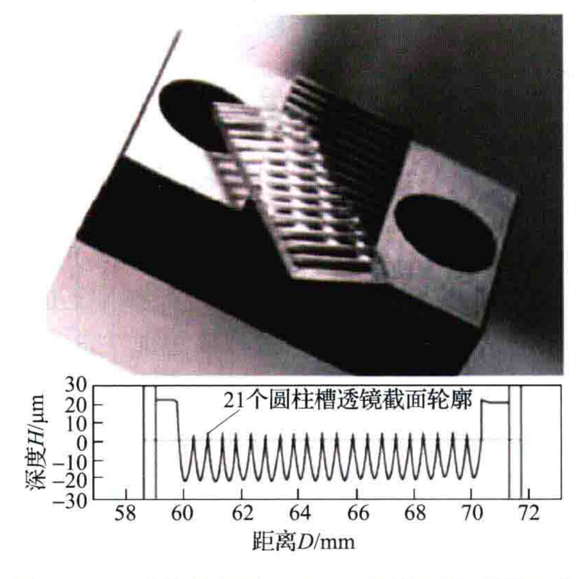


图6－52 碳化钨材料上加工的圆柱槽阵列微结构

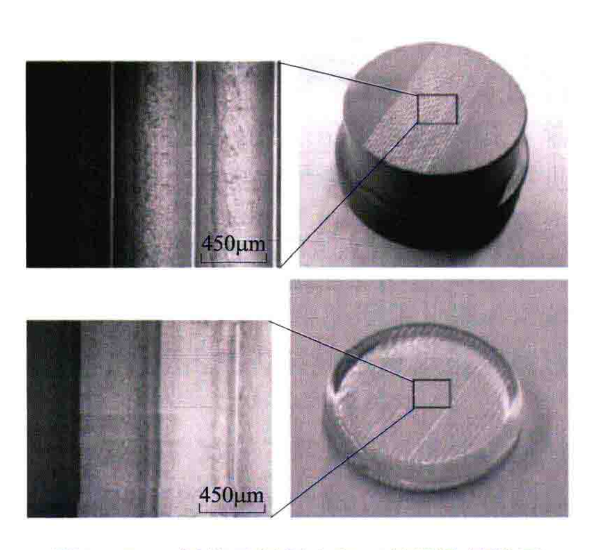


图6－53 氮化硅材料上加工的圆柱槽阵列微结构以及模压后的玻璃元件

出与其他微细加工方法相比，超精密磨削加工技术更能有效地保证微结构表面的面形精度，但在微结构表面的边缘和内角处，仍然会有较大的误差，这主要因为在加工过程中金刚石砂轮的尖锐部分极易磨损。同时也指出在相同情况下与球面和非球面等回转对称结构相比，微结构表面的超精密磨削材料去除率较低，而且磨削后的表面粗糙度也较大。

德国弗劳恩霍夫生产工程研究所（IPT）在无结合剂碳化钨、碳化硅和氮化硅等超硬模具材料上使用金刚石砂轮进行了大量的微结构表面磨削加工试验研究。他们采用微砂轮轨迹磨削的方法对窥视矩阵微结构表面模具进行了加工试验，加工后的表面粗糙度小于10nm，并随后进行了玻璃模压试验。IPT指出目前对于这些超硬材料的微结构表面模具来说唯一行之有效的加工方法是超精密磨削。

日本神户大学在硬质合金和陶瓷材料上使用带有尖角的金刚石砂轮通过 Y 轴和 Z 轴的联动磨削加工出了菲涅尔透镜玻璃模压模具，面形精度（PV）达0.1μm，图6－54为加工示意图。同时也用树脂基金刚石砂轮，采用四轴联动的方法磨削加工出了直径为100μm的微透镜阵列（由19个微透镜组成），每个微透镜的面形精度（PV）都在0.1μm至0.2μm之间，如图6－55所示。

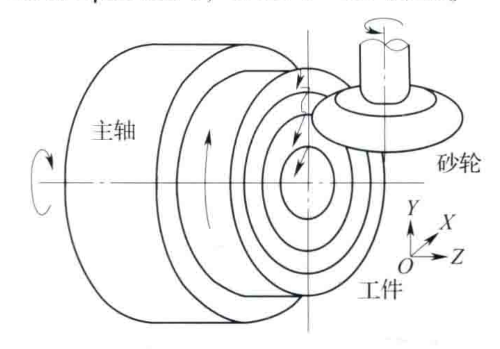
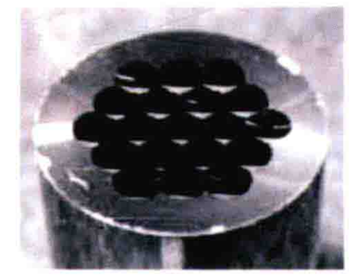


图6－54 菲涅尔透镜模具加工示意图



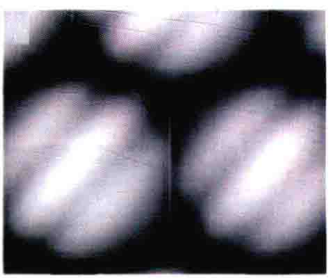


图6－55 磨削加工的微透镜阵列

为了能加工出更复杂、更微小的微结构表面模具，德国凯泽斯劳滕大学使用电镀的方法制造了直径为13～100μm的粒度为1～3μm的单晶金刚石微磨削笔，并采用一种新颖的高速高精密空气主轴在硬质合金和碳化物陶瓷材料上进行了微槽结构的加工试验，如图6－56所示。加工后的微槽底部表面粗糙度 Ra 可达10nm，同时微槽具有非常尖锐的边缘。研究者指出这样的加工结果主要取决于统一的金刚石粒度和均匀的电镀层，以及具有60000r/min转速的高精密主轴。但就效率而言，由于砂轮直径的限制，即使采用了如此高的转速，其材料去除率仍然较低。

德国弗劳恩霍夫表面工程与薄膜协会的加布勒（Gabler）等通过金刚石化学气相沉积（Chemicalvapordeposition，CVD）技术对磨削工具进行了改进。与传统烧结金刚石砂轮制备技术相比，CVD金刚石涂层技术不但可以制造出具有更复杂、更微小的磨削工具，而且还可以得到更细的“金刚石颗粒”粒度。但是其研究指出CVD金刚石砂轮的容屑空间要比烧结金刚石砂轮小得多，因此其磨削效率受到了极大的限制。

德国不伦瑞克理工大学在硬脆材料的微结构表面磨削方面进行了大量的研究。他们不但通过超精密磨削加工出了具有1∶15大深宽比的微结构表面，如图6－57所示，而且还对比了烧结盘状金刚石砂轮、电镀金刚石笔、烧结金刚石笔和CVD金刚石笔在硬脆微结构加工上的磨削性能。结果表明虽然盘状金刚石砂轮不如金刚石笔更具制造柔性，但是前

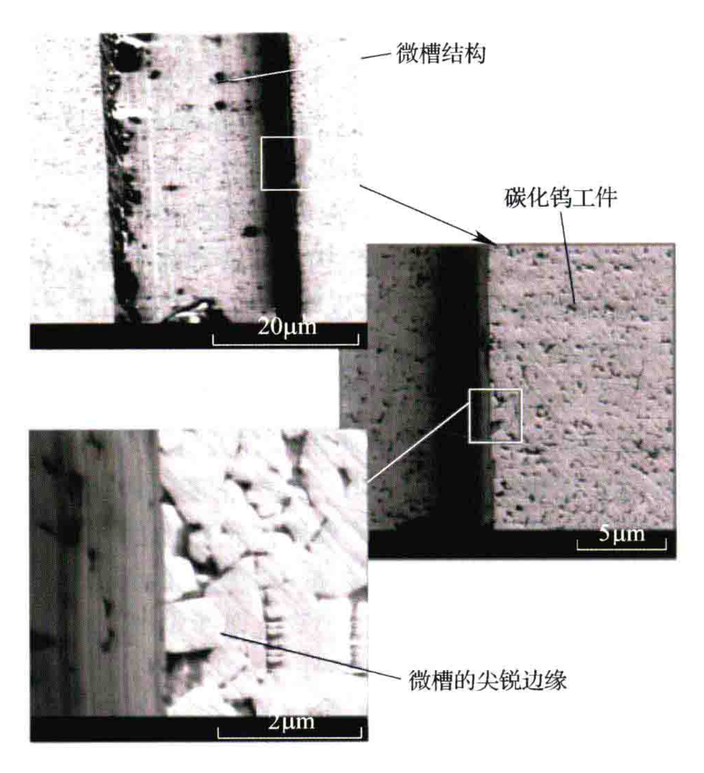


图 6－56　电镀金刚石微型砂轮磨削后的微槽结构

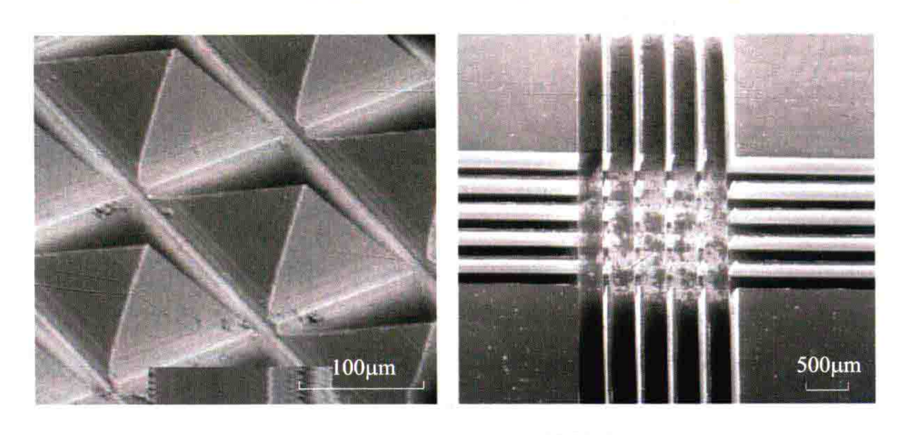


图 6－57　磨削加工的微结构表面

者可以得到更好的表面质量，更高的加工效率。同时在加工微结构表面时盘状金刚石砂轮具有更高的刚度和更好的耐磨性，因此更适用于微结构光学功能表面的加工。

综上所述，针对微结构光学功能元件模具，超精密磨削加工方法是目前唯一行之有效的加工方法。其具有很多优势，如能够加工真正的三维结构；加工零件的成形精度达亚微米级，表面粗糙度达到纳米量级；能够加工大深宽比的结构以及适合于硬脆材料的加工等。因此，超精密磨削加工技术对于微结构光学功能元件的大批量、高效率、低成本生产起着重要的作用。然而，由于微结构光学功能表面的加工属于典型的跨尺度加工，其通常既要求具有微米级或是亚微米级的面形精度，又要求具有纳米级的表面粗糙度。而且与平面或自由曲面等传统连续光学表面不同，微结构光学功能表面具有很强的非连续性，通常是由若干个独立的表面组成，独立表面的交界处具有极难加工的尖锐部分或内尖角。同时，超硬的模具材料本身又具有极难加工性。因此，与传统磨削相比，微结构光学功能元

件模具的磨削加工更为困难。

6.4.3.2　微结构模具超精密磨削关键技术

（1）微结构磨削用砂轮的精密修整

在微结构光学功能元件模具的超精密磨削加工中，砂轮的几何形状受到微结构表面几何尺寸的制约，通常具有微小精密的几何外观尺寸，在磨削加工过程中砂轮的尖锐部分极易磨损。为了减少砂轮磨损，在微结构光学功能元件模具加工中常使用高浓度细粒度的金刚石或立方氮化硼（Cubic Boron Nitride，CBN）磨粒。同时为了更好地保证磨削后表面的面形精度，加工时还需要对砂轮进行多次精密修整。砂轮的修整精度将直接影响最终加工的微结构表面精度，特别是对于微结构的内角。然而高精度的微小几何外观尺寸和高浓度的超硬颗粒使得对这类砂轮的精密修整不同于传统砂轮的修整。

德国不来梅大学使用放电加工技术（Electrical Discharge Machining，EDM）对金属基金刚石砂轮进行了精密修形和修锐，如图 6－58 所示。与传统修整方式相比，EDM 可以进行复杂表面砂轮的精密修整。同时试验中使用电子能量损失谱（Electronen Ergy Loss Spectroscopy，EELS）对修整后的金刚石颗粒进行了热损伤分析，结果表明 EDM 虽然会使金刚石颗粒产生一定的热损伤，但是其损伤仅限于金刚石颗粒的表面，因此，EDM 适用于金属基金刚石砂轮的精密修整。

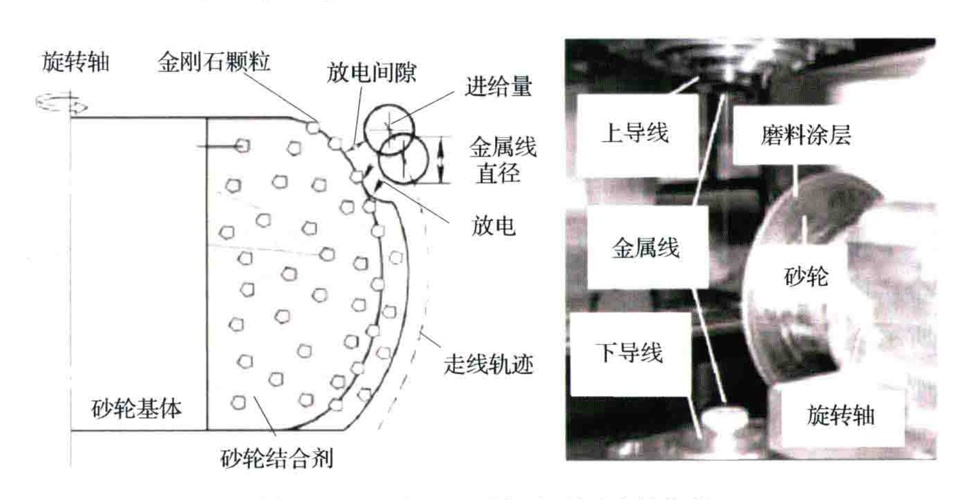
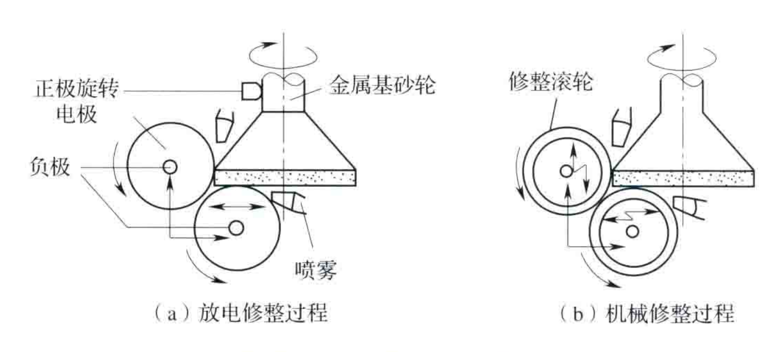


图 6－58　用 EDM 进行金刚石砂轮修整

日本理化研究所（RIKEN）对 SUBARU 天文望远镜中的浸没光栅进行了加工研究。研究中对比了激光加工、化学腐蚀、离子束加工等非机械加工方法和金刚石砂轮磨削加工技术。结果表明非机械加工方法既无法获得足够面形精度和表面粗糙度，也不能保证光栅尖锐的内角和尖角部分，所以不适用于光栅类微结构光学功能表面的加工。而在超硬材料平面和自由曲面磨削加工中常用的树脂基金刚石砂轮，由于其在磨削中具有较大弹性变形，也无法加工出具有足够小内角的光栅。因此，金属基金刚石砂轮磨削是唯一适用于光栅类微结构光学功能表面的加工方法。而对于金属基金刚石砂轮的精密修整，结合数控 EDM 滚轮放电修整和金刚石滚轮修整可以满足这类微结构表面砂轮的精密修整要求，如图 6－59 所示。而对于砂轮的修锐，与传统的单电极在线电解修锐（Electro Lytic Inprocess Dressing，ELID）相比，使用分体式电极可以获得更锋利的砂轮尖角，从而得到更小的微结构内角半径。



（a）放电修整过程　　（b）机械修整过程

图 6－59　使用 EDM 和滚轮进行金刚石砂轮修整

德国不伦瑞克理工大学针对微结构磨削用的 CBN 微砂轮设计制造了微型的金刚石滚轮，如图 6－60 所示。其中电镀金刚石修整轮的基体材料为钢，而金刚石涂层修整轮的基体材料为硅。试验结果表明这种微金刚石滚轮修整技术具有实施简单、修整时间短、修整精度高，以及可以在位修整等优点，能够修整的最小砂轮厚度为 100μm。

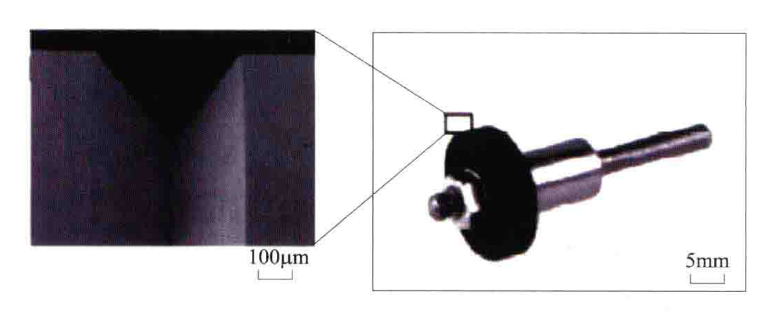


图 6－60　用于 CBN 砂轮修整的微金刚石砂轮

华南理工大学采用绿碳化硅修整块对 60°尖角金属基金刚石砂轮进行了修整试验，并对硅材料进行金字塔微结构的磨削加工试验研究。修整后的金刚石砂轮尖角半径小于 20μm，如图 6－61 所示。磨削后的微结构表面面形精度可达 3.4μm，但由于材料的脆性及砂轮尖角的修整精度限制，在微金字塔的底角和顶角处的误差分别为 23.1μm、47.9μm。

从以上研究结果看来，对于微结构表面磨削用砂轮的精密修整技术多采用放电修整、滚轮修整或是将两者相结合。比较而言，放电修整后的砂轮面形精度更高，并且更适用于复杂砂轮，但是实施较复杂。而机械滚轮修整后的砂轮磨削性更好，试验简单，但是不适用于复杂砂轮的修整，同时修整效率较低。

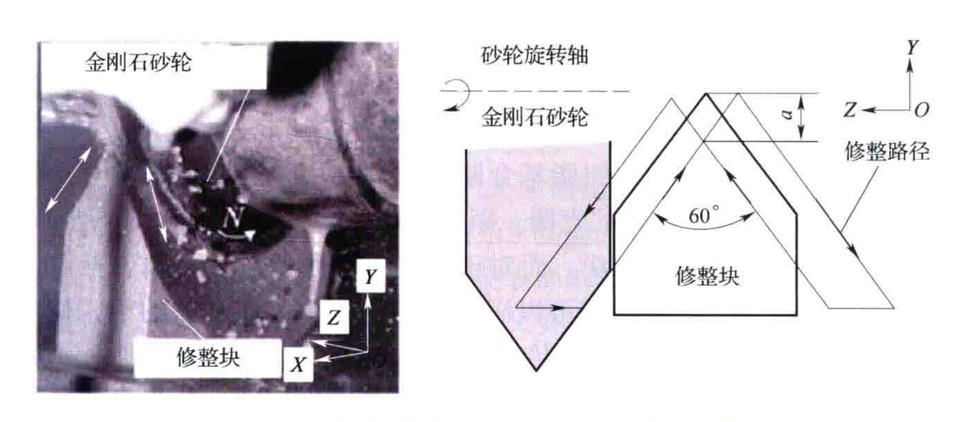


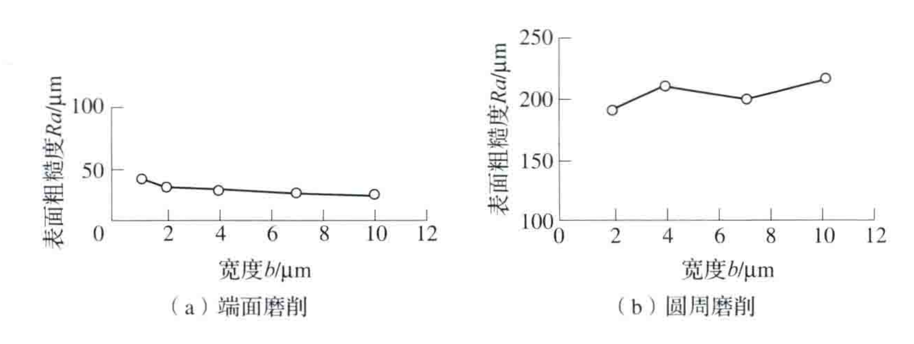
图 6－61　采用修整块对 V 形金刚石砂轮进行修整

（2）微结构磨削表面质量均一性保证

由于微结构表面具有很强的非连续性，其磨削状态（如磨削力、磨削轨迹和材料去除率等）受表面结构性的影响，磨削后微结构表面各点表面质量不同，即表面质量不均一。同时这种不稳定的加工状态也使得在相同情况下，磨削后的微结构表面比平面和球面等传统连续表面更难获得良好的表面质量。此外由于表面结构性使得对磨削后微结构表面的检测也相对困难。

韩国釜山国立大学使用金刚石切割片对等离子体平板中的隔墙微结构光学元件用碳化钨模具进行了磨削加工研究。研究中使用破坏性检查方法对微槽结构的侧表面粗糙度进行了测量，并与微槽底部表面粗糙度进行了对比。结果表明微槽的侧表面粗糙度 *Ra* 最大值为 120nm，而底部表面糙度 *Ra* 最大值为 297nm，说明在微结构表面磨削加工过程中存在着精度不均一性。

德国汉诺威大学在对具有微结构表面的陶瓷基微空气静压导轨进行超精密磨削加工研究中，分别使用了外圆磨削和端面磨削的工艺方法，如图 6－62 所示。通过对比不同磨削方式下的磨削力和加工后微导轨的表面粗糙度，可以发现磨削过程的运动学特征和磨削参数都对磨削过程状态和最终的工件质量有着非常重要的影响。由此可以解释在微结构表面的磨削加工过程中，产生表面质量不均一性的原因。美国罗切斯特大学光学制造中心在进行磨削试验时发现，磨削后的表面形貌会呈现出规律变化的磨削痕迹，通过对表面形貌的频谱分析可知在确定性的精密磨削加工中，磨削参数与磨削后的表面形貌有着密切的关系，其中对表面形貌影响最大的磨削参数分别是磨削方式、砂轮与工件的转速比、驻留时间和砂轮线速度。



（a）端面磨削　（b）圆周磨削

图 6－62　不同磨削方式下的表面粗糙度对比

哈尔滨工业大学精密工程研究所采用 1A1 型砂轮在无结合剂碳化钨材料上对阶梯光栅进行了磨削加工试验研究，由于采用的是仿形磨削法，因此加工中阶梯光栅微结构侧面由砂轮端面加工而成，而阶梯光栅微结构底面由砂轮圆周面加工而成。加工结果表明磨削后的阶梯光栅存在表面质量不均一现象，侧表面所获得的表面质量小于阶梯光栅底面。与普通平面磨削相同，无论是对于微结构侧面还是底面，随着进给率的降低，其加工后的表面粗糙度都在降低。而主轴转速对表面粗糙度的影响不大，如图 6－63 所示。

（3）微结构表面尖锐部分的精度保证

微结构光学功能元件是由多个离散表面组成的非连续表面，因此在两个或多个离散表面交汇处都会形成尖锐部分。加工中由于磨削力以及砂轮磨损的存在，使得在这些尖锐处极易发生钝化现象，损失面形精度。如图 6－64 所示为 LFM 加工的微圆弧阵列，从中可

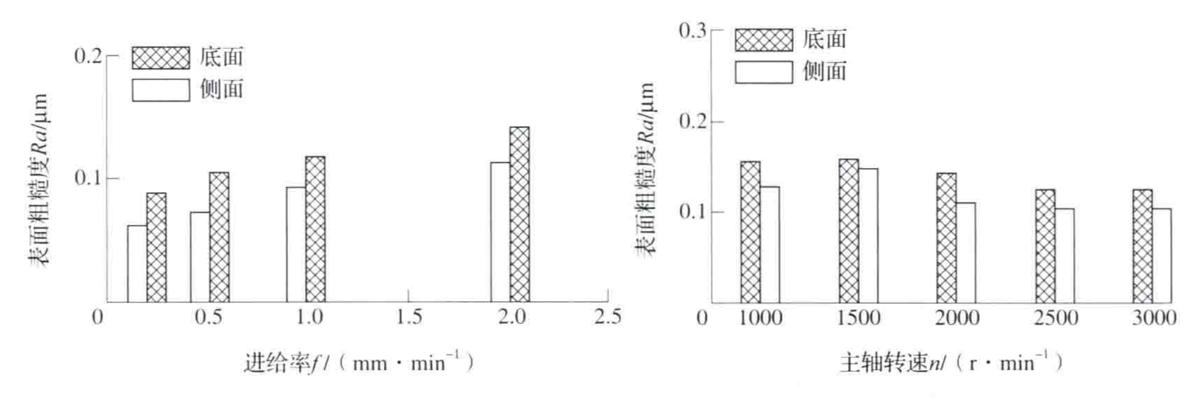
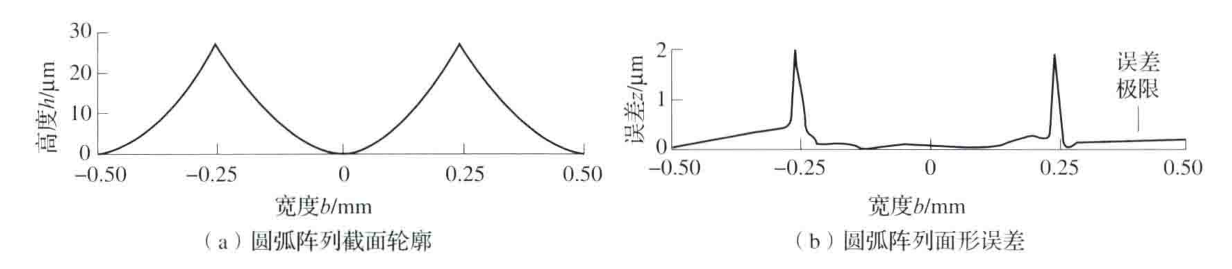


图 6-63　进给率和主轴转速对微结构表面粗糙度的影响

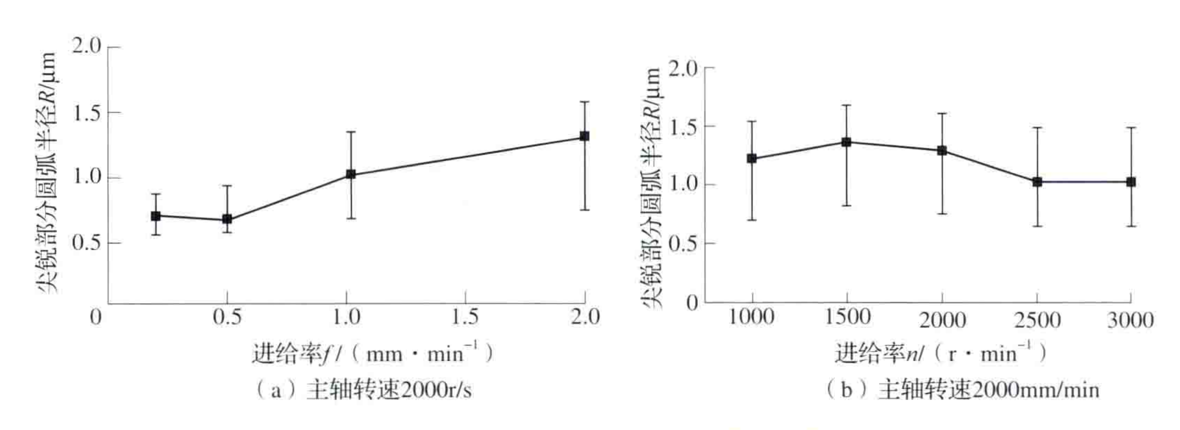


（a）圆弧阵列截面轮廓　　（b）圆弧阵列面形误差

图 6-64　磨削加工后圆弧阵列的面形精度

以看出在两个圆弧面相交的尖锐部分，其面形误差是圆弧面部分误差的4倍。此外，由于模具材料通常具有硬脆特性，因此在加工中微结构的尖锐部分很容易发生断裂破损，从而进一步损失面形精度，最终影响复制后微结构光学功能元件的光学性能。因此微结构表面尖锐部分的精度保证是其磨削加工中的关键。

哈尔滨工业大学在无结合剂碳化钨材料上研究了磨削工艺对尖锐部分圆弧半径的影响规律。试验结果表明随着进给率的降低，微结构表面尖锐部分的平均圆弧半径基本呈现减小趋势。相比进给率，主轴转速对微结构表面尖锐部分圆弧半径的影响并不大，如图6-65所示。当进给率为0.5mm/min，主轴转速为2000r/min时，平均圆弧半径可达0.67μm。



（a）主轴转速2000r/s　　（b）主轴转速2000mm/min

图 6-65　进给率和主轴转速对微结构尖锐部分圆弧半径的影响

6.4.4　微结构特征飞秒激光精细加工

20 世纪 80 年代，随着宽带可调谐激光晶体和自锁模技术的出现，以蓝宝石为介质的新一代飞秒激光器的问世标志着激光加工进入了一个崭新的发展阶段，1992 年飞秒激光引入到了材料微加工领域。通过减少或消除间接损伤、等离子体效应和热扩散的影响，从而在根本上改变了激光与物质相互作用的机制，使超快激光加工成为具有超高精度、超高空间分辨率和超高广泛性的“冷”处理过程。因此具有脉冲宽度极短、峰值功率极高等一系列优点的飞秒激光加工可以获得更高的加工品质特征，实现了对几乎所有材料的准三维加工，开创了微加工领域的新纪元。

6.4.4.1　飞秒激光加工机理和特点

飞秒激光脉冲的光束特性决定了它是激光微细加工中最理想的工具。飞秒激光加工可以实现小于焦点光斑尺寸的精度加工，原因在于多光子吸收的光强依赖性。

（1）飞秒激光加工机理

首先，飞秒激光加工时存在着准确的多光子吸收阈值。从光和物质相互作用的角度而言，飞秒激光是在极短的时间、极小的空间尺度、极端的物理条件下对物质进行加工，其过程与传统的激光加工线性吸收不同，主要涉及多光子吸收，如图 6－66 所示。多光子吸收与照射的激光强度 I_p 以及电磁场强度密切相关，强的激光强度同时又激励了强的电磁场，这样极大的刺激了多光子吸收。当激光强度 I_p 位于 $10^{12} \sim 10^{14}$ W/cm^2 时，材料中的电子将同时吸收多个光子，在高强度激光电磁场中可以容易地从原子和分子中剥离电子而产生电离；当激光强度 I_p 增加到 $10^{14} \sim 10^{16}$ W/cm^2 时，激光强光场产生的电势将使得原子固有势垒在一定程度上得到抑制，从而导致电子通过隧道效应获得电离；当激光强度继续增加，I_p 大于 10^{16} W/cm^2 时，强场势能使得电子从原子束缚中彻底逃逸。这些电离产生的电子作为种子电子，又可以进一步吸收光子产生更多的自由电子。这些种子电子密度不依赖于外在介质，并且不呈现大的统计波动，光对物质的作用就从统计属性变成了一种确定行为，具有准确的加工阈值。

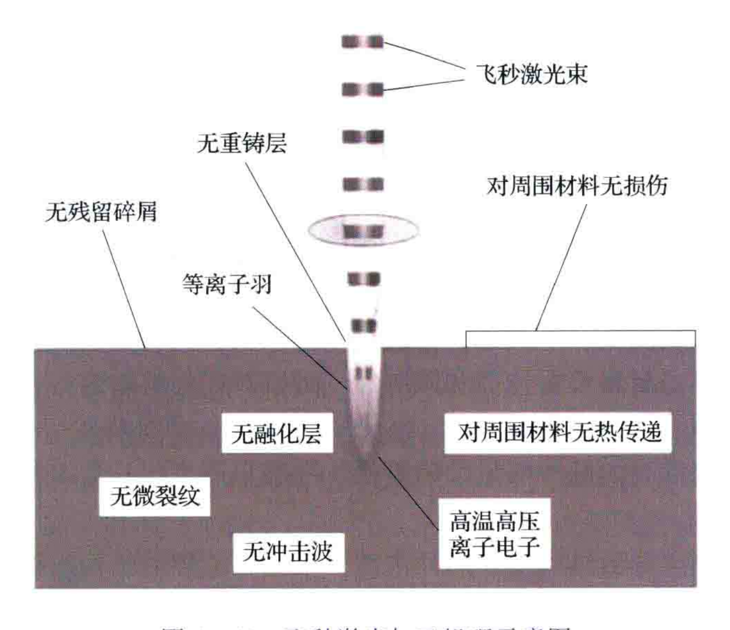


图 6－66　飞秒激光加工机理示意图

其次，激光光束光强在空间呈高斯分布或类高斯分布，聚焦光斑的能量分布不均匀，使得光斑内的光强分布存在很大的梯度，这样聚焦到物质上的激光强度 I_p 就是位置 x 和时间 t 的函数。光斑中心区域的光强极高，超过了多光子吸收阈值；而其他部分的光强相对较低，低于多光子吸收阈值。对于能量有限的飞秒激光脉冲而言，只有超过多光子吸收阈值的照射区域，才会出现明确的加工行为。所以，这就不难理解飞秒激光加工时得到小于聚焦光斑尺寸的加工精度了。

（2）等离子体屏蔽的回避

在传统的激光加工中，从固体表面喷出并膨胀的等离子体会吸收激光，通过等离子体中的热传导，使激光能量注入加工领域。当照射激光的脉宽与等离子体的形成时间相比足够长时，激光等离子体频率与照射激光频率达到平衡，即在临界密度领域被遮蔽，无法再继续进入被加工物质，这就是所谓的等离子体屏蔽。按通常的激光脉冲标准来说，持续时间小于 10ps（相当于热传导时间）的激光脉冲属于短脉冲。作为超短脉冲的飞秒激光，由于激光等离子体从表面向外侧膨胀时的膨胀速度约为 10^4 m/s，如果使用的激光脉冲宽度在 100fs 以下，很明显，在等离子体膨胀之前，激光照射即已停止，从而回避了等离子体屏蔽。

（3）热扩散的回避

飞秒激光加工的最大特点是与物质的热扩散相比，激光脉冲可以在更短的时间内将能量注入到被加工区域。也就是说，在照射到材料中的能量热扩散之前，激光脉冲即已结束，所以能量不存在照射区域的热扩散问题，从而可以得到极高的热效率精加工。即使对于热扩散系数大的金属，当脉冲宽度为 100fs 时，激光照射产生的热扩散长度也只有 1nm，所以基本可以忽略热扩散问题。

因为回避了热扩散，而消除了热扩散效应带来的几个不利的影响。首先，减少了因热扩散而损失掉的能量，提高了激光的热加工效率。其次，由于不存在热扩散降低激光聚焦点的温度，使得该区域不会有仅处于熔融状态的材料，从而避免了熔融材料的飞溅引起的材料污染和清除污染物所需要的加工成本。再者，没有热扩散，就不会产生热影响区；同时也不会产生导致结构损坏的冲击波，这样就不会损坏临近结构组织，不产生微裂纹，从而提高了激光微细加工的精确度和质量。

（4）飞秒激光脉冲在微细加工中的优势

①飞秒激光加工的组织中没有熔融区，没有重铸层，不产生微裂纹。这是飞秒加工的最重要特征。避免了热熔化的存在，实现了相对意义上的“冷”加工，大大减弱和消除了传统加工中热效应带来的诸多负面影响。

②飞秒激光加工精度高，不受光的衍射极限的限制，具有很高的空间分辨性。

③飞秒激光加工对材料没有选择和限制性，可以对任何材料进行精细加工、修复和处理。

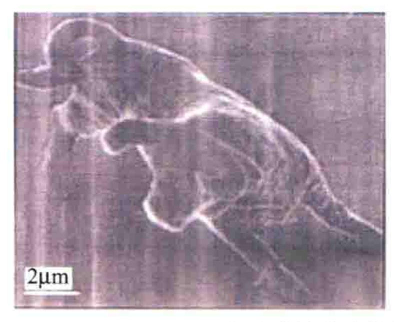
④飞秒激光加工需要的脉冲能量阈值极低，一般只有毫焦耳量级，这决定了加工能量的低耗性。

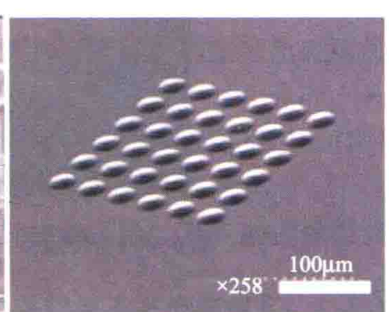
⑤加工过程不产生导致结构损坏的冲击波，不损坏临界的结构组织。

6.4.4.2 飞秒激光加工微结构概况

21 世纪初，日本大阪大学在光敏树脂内部加工出红细胞大小（长 10μm、高 7μm）

的纳米结构，如图6-67（a）所示。这是科学家利用飞秒激光双光子聚合技术首次突破衍射极限获得120nm的加工分辨率，实现了利用双光子加工技术制造亚微米精度三维结构的目标，并证明应用飞秒激光可以实现复杂形貌的加工。



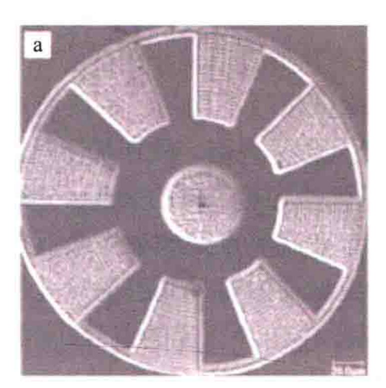
（a）聚合物内部加工的纳米结构

（b）微透镜阵列

图6-67 飞秒激光加工的微结构特征

大阪大学利用飞秒激光（波长780nm，脉冲宽度128fs，重复频率100MHz），于2009年在玻璃表面加工出了透镜阵列结构，如图6-67（b）所示。其中每一个透镜的直径为38μm，高为4.5μm，而且材料去除率更是高达0.05μm/min。

飞秒激光还可以对硬脆材料实现微结构的高效去除（0.01～1μm/脉冲）加工。爱荷华州立大学利用飞秒激光对SiC材料的去除机理和微结构成形过程进行了研究。结果表明，高能量和低能量对材料的去除过程完全不同：高能量时以热过程为主，而在低能量时则表现出较强的多光子破坏效应。根据试验结果，该小组利用能量分别为0.5μJ和1μJ的飞秒激光在SiC膜层加工出了微电机转子（直径约为100μm）和谐振腔，结构如图6-68所示。



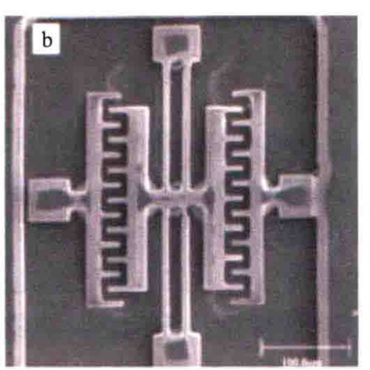


图6-68 利用飞秒激光加工的电机转子和谐振腔

德国汉诺威激光中心的飞秒激光微加工研究小组利用飞秒激光加工的优势，结合CAD模拟仿真技术对氧化锆陶瓷实现了精细三维微结构的加工。在没有改变陶瓷材料本身属性的前提下，实现了牙齿修复时对高精度的要求。不仅与人体组织结构具有良好的兼容性，也大大提高了加工效率（如图6-69所示），这充分说明飞秒激光在复杂三维曲面的高精度加工中的能力。

利用飞秒激光微加工技术在多种材料上加工的上述这些高度复杂的微结构，不仅显示出了该项技术无可比拟的加工优势，同时也展示了其广阔的应用前景。

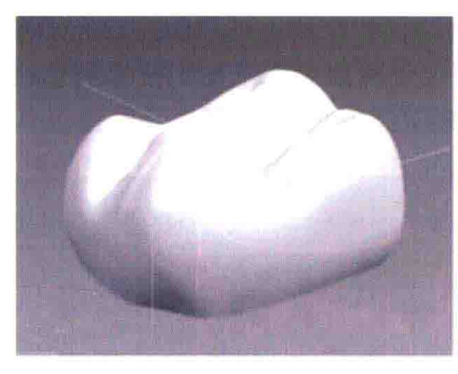


图 6－69　传统方法和飞秒激光加工方法对牙齿修复加工结果的对比

6.4.4.3　飞秒激光加工微结构关键技术

与传统的机械加工相同，设备及工艺是实现微结构特征飞秒激光加工的关键，飞秒激光加工系统主要包括飞秒激光器、高精度多轴运动平台以及控制系统，而飞秒激光加工系统中的光阑、焦点、激光能量、重复频率、脉宽、扫描速度、扫描次数等因素则是加工中的关键工艺参数。

飞秒激光问世以来，以钛宝石晶体为主的增益介质、克尔透镜锁模和半导体可饱和吸收镜等技术促使着它从染料激光器发展到自动克尔透镜锁模激光器，以及后来的二极管泵浦全固态飞秒激光器和飞秒光纤激光器，优质、高效、稳定、可靠、廉价的光源是进行激光微加工的应用前提。高精度定位平台及控制系统是实现高精度微细加工的前提，根据不同的应用场合和等级，目前商用飞秒激光加工系统定位平台精度一般从微米级到纳米级。

光阑直接决定激光的质量及能量，在不同的光阑下，采用相同的激光能量加工微孔，加工后的形貌会出现明显的差异。在相同的能量、不同光阑条件下，加工后的形貌上有很大差异。随着光阑的增大，可以明显观察到激光入射口的质量逐渐变差，而且边沿处开始出现裂纹、崩碎。这是由于光阑过大，含杂光的激光束直接通过透镜作用在物体的表面，此时光阑没有起到对激光束“整形”的作用，故激光的能量相当不均匀，从而造成在加工过程中孔的边缘出现裂纹、龟裂的现象，造成孔的形状极其的不规则。故在加工过程中尽可能的采用较小的光阑。但是过小的光阑会阻止大部分能量无法到达工件的表面，造成能量的浪费。

焦点位置是影响激光加工的主要因素，正常来说焦点处的激光最适合加工。尤其是飞秒激光，其强度呈高斯分布，在焦点处激光的质量均匀而且光斑的尺寸最小，满足微加工的要求。但由于 CCD 的焦距与消色差物镜的焦距存在着一定的差异，因此在通过 CCD 寻找焦平面时，屏幕上所看到的最清晰的位置并不是焦平面。飞秒激光脉冲呈高斯型分布，径向上与光斑中心距离一定距离的能量密度也呈高斯型分布。激光脉冲在距离焦平面不同的位置处的功率密度也是不同的：距离焦点的位置越远，其功率密度就越小。由于高斯光束能量分布极其的不均匀，因此焦平面的选取对加工尺寸和形貌有着很大的影响。

激光能量在飞秒激光微细加工过程中起着主导作用，不仅决定微结构特征的加工尺寸和加工形貌，而且直接决定了其加工质量。重复频率对激光能量、加工形貌有着重要的影响，过高的频率容易造成材料的崩碎、飞溅，较低的频率能保证加工效果。增大激光能量固然可以增加刻蚀微孔的深度，但是有时候能量过大会使得微孔的周围产生裂纹甚至带来碎屑严重的重凝结，对此采用增大脉冲数目来获取比较深的孔，可以保证一定的可观的加

工形貌。一般来说，较低的能量将会得到高质量的微孔或者微槽。

飞秒激光的脉宽数量级为 10^{-15}，正是基于超短的脉宽，使得飞秒激光在加工过程中体现出了独特的加工优势，即热影响区小、峰值功率高。当激光能量和频率保持不变时，峰值功率与脉宽成反比关系，故当脉冲宽度越小时峰值功率越大，其加工特征的深度越深。当脉宽越宽时，尤其是达到皮秒范围时，其热影响显得尤为明显，加工处出现裂纹和崩碎现象，并出现了热应力集中的现象，表面质量较差。此外在激光加工微小孔时，孔的深度与激光作用时间存在着明显的关系，即在一定范围内，深度随着时间的延长而增加，但是孔的直径基本上与作用时间无关，能量和脉宽是影响微孔直径的关键因素。

当采用飞秒激光加工微型腔时，利用高精度位移台进行扫描进给，其扫描速度及扫描次数对加工表面特征的尺寸和质量也有着很大的影响。

扫描速度较低时，其加工深度没有发生明显的变化；而扫描速度较高时，其深度就会随着速度的增大而减少，但两种扫描速度下加工宽度基本上不会发生变化。低速时大部分激光能量能够有效的照射在基片表面上，工件能够充分的吸收激光能量并趋近于饱和，故刻蚀微槽的深度变化不是特别的明显。而高速时照射在基片表面上的有效激光能量随着扫描速度的增大而减小，故微槽深度逐渐减小。当速度很大时，照射在石英基片上的有效能量远低于被加工材料的烧蚀阈值，根本无法被刻蚀，而且表面形貌很差。

对于加工深度比较深的微槽，不外乎由以下工艺来满足：采用较大能量和采用较多的扫描次数。较高的能量容易造成形貌的破坏，故增加扫描次数是一个比较理想的选择。

在低速扫描情况下，由于激光加工的有效能量密度已经十分地接近被加工材料的烧蚀阈值，加之槽内残留物积聚过多，导致扫描 1 ~ 2 次后刻蚀深度基本保持不变。当高速扫描情况下，微槽深度和宽度随扫描次数增加而增大，但其增加的趋势越来越平缓，说明材料吸收激光能量已经达到饱和。扫描次数越多，微槽形貌越差，这是由于激光福照次数过多引起的热影响造成的。

飞秒激光微加工技术目前还处于起步阶段，该技术的发展和应用仍有一系列关键的技术问题亟待解决：

①注重飞秒激光微加工系统的工程化生产，在稳步提升其特性的基础之上，将其外形结构进一步规范化、体积进一步小型化，并降低系统的复杂性，尤其是要改善其微加工工作环境的适应性，延长其寿命并要大幅提升系统的可靠性，以及数控化和自动化程度，从而推进其在科研以及工业生产中的发展进程。

②飞秒激光微加工技术目前主要还局限于实验室研究阶段，因此应尽快探索出一条该技术发展的产业化途径，从而为加快解决高精密微结构在机械、材料科学、生物医疗、航空航天、电子通信等国家急需的重大产业等领域的应用提供强大的技术支撑，并进一步拓展该技术的应用领域。

③要进一步大幅提升飞秒激光微加工效率方案的探讨。与刻蚀技术相比，尽管其加工效率获得了极大提高，但就其昂贵的激光源及加工组件而言，该项技术的产出效率仍然较低。要想实现加工微小结构的成本大大降低，效率大幅提升，一种有效的方式就是利用该技术加工微小模具，然后进行复制加工。

④要不断拓宽飞秒激光加工材料的领域，以满足对层出不穷的新材料的成形及微加工的迫切需求。尽管已从理论上证实该技术可以对几乎所有的材料实现精密加工，但目前还

主要集中在有机聚合材料、金属和透明等材料方面，对于超硬材料的加工研究的却较少，如碳化硅、碳化钨和金刚石等，而这些材料正是加工微小模具的理想选择。

6.4.5 挠性结构件微沟槽高质量表面研抛工艺

微小型加速度计是一个具有薄壁微结构的弹性敏感元件，其表面的微观几何待征和物理力学性能，对工件的使用性能，尤其是对高速、高温、高压条件下工作的工件的可靠性有很大的影响，所以不仅尺寸精度高，其表面质量要求也非常高。所以无论采用铣削还是电加工工艺，最终工序都需要对零件上的薄壁微沟槽进行研磨抛光，抛光设备的设计和特点详见第3章3.5节。本章节中论述的研抛工艺都是基于上述设备。

6.4.5.1 对刀方案

（1）对刀原理

由于挠性结构件微沟槽研抛时对刀完成后研抛轮与工件的位置关系应满足如下要求（如图6－70所示）：

①底部相切：在垂直于槽表面的方向，要求研抛轮与槽表面相切，即在槽开口方向，研抛轮的最低点与槽表面恰好接触；

②侧壁等距：在槽宽方向，要求研抛轮处于槽内中间位置，即研抛轮两侧与槽侧壁的距离基本相等。

所以对刀精度要求均为微米级别，而研抛设备所采用电移台的光电接近开关的精度远低于此，而且在水平方向上工件的位置并不固定，所以不能使用回零位后进行对刀的方法。若使用CCD进行辅助观察，通过手轮控制各轴运动进行人工对刀的传统方法，受到放大倍数限制以及从正向观察时不利于对焦，导致观察和判断极为困难。

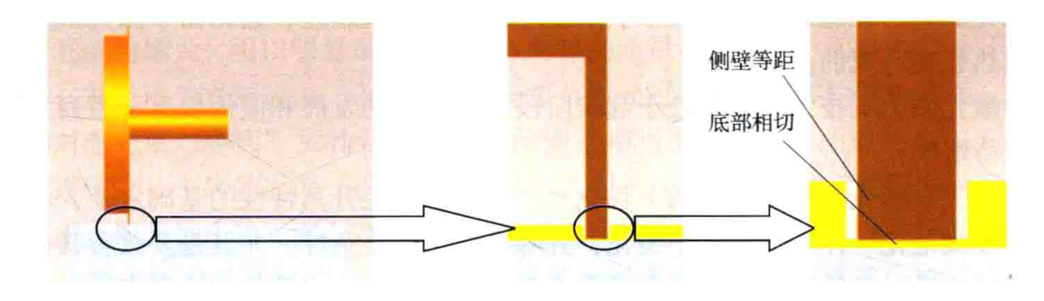


图6－70 挠性结构件微沟槽研抛理想对刀位置示意图

结合研抛设备的特点，利用具有微力感知功能的夹具来反馈研抛轮与工件相对空间位置情况的对刀方案，即在研抛轮与工件之间脱离—接触—再脱离的过程中，通过传感器反馈电压的变化情况得到两者的接触状态。加上光栅尺反馈信号的辅助，实现精确对刀，其原理流程图见图6－71。

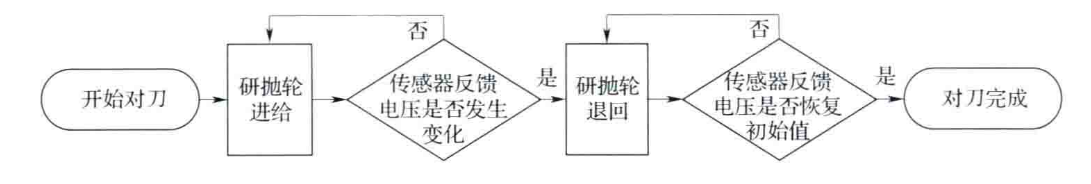


图6－71 对刀原理流程图

（2）自动对刀方案设计

由于研抛轮和工件的初始相对位置并不是固定的，在实际对刀中，只采用上述对刀方案的情况下，一方面需要 CCD 辅助进行粗略定位，将研抛轮移动到槽的上方，另一方面还需操作者进行较多繁琐的操作，为降低对刀要求和操作难度，提高对刀效率和质量，有必要设计自动对刀方案。根据研抛轮与工件的具体形状尺寸，规划自动对刀过程如图 6－72 所示。

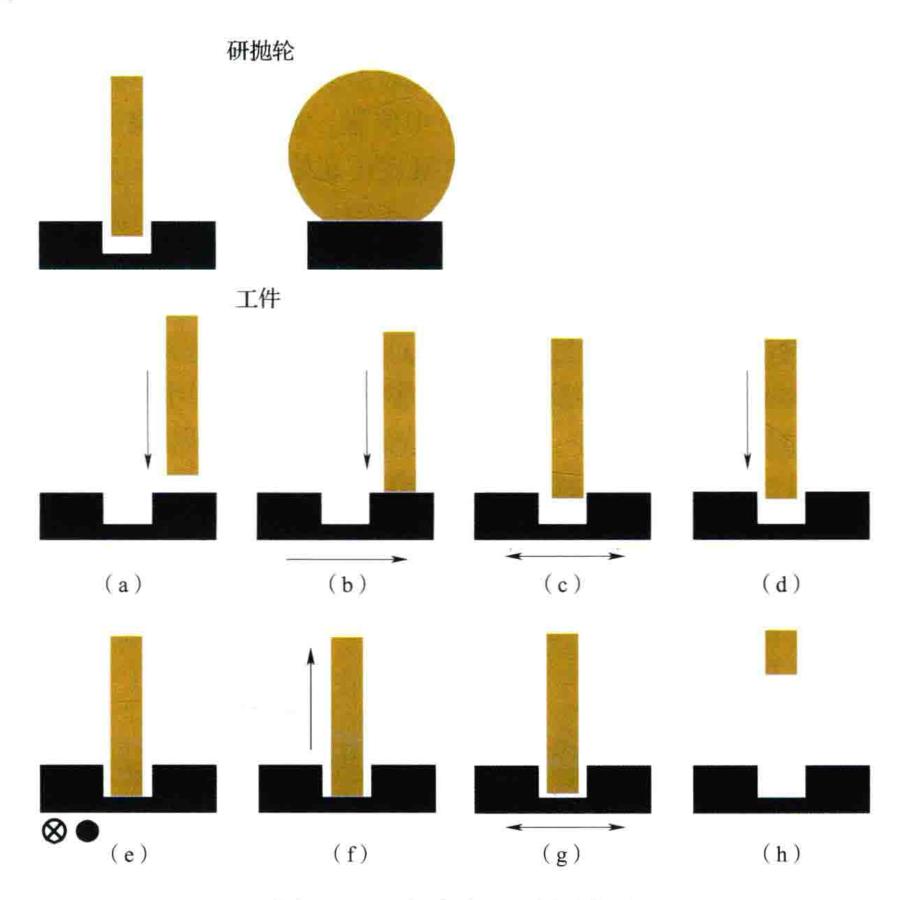


图 6－72　自动对刀过程示意图

该示意图中各步骤分别说明如下：

①如图 6－72（a）所示，为起始位置，由操作者将研抛轮移动至槽右上方，然后研抛轮向下运动，开始对工件的上表面进行对刀。

②对上表面对刀结束后，研抛轮与工件上表面处于刚好接触的状态，将研抛轮向下进给微小距离（程序中取为 3μm），压住工件表面，由工作台拖动工件向右移动，如图 6－72（b）所示。由于工件受压，微力感知夹具反馈的电压信号减小，当工件移动至研抛轮落入槽中的位置时，工件受压消失，反馈的电压信号恢复初始值。

③研抛轮落入槽中后，工件做左右往复运动，分别对槽的右侧壁和左侧壁对刀，水平方向的对刀原理与竖直方向简单对刀原理类似，只是工件退回时仍由电机驱动，而不是微动平台驱动，该步骤结束时，槽上部侧壁位置已确定，即上部侧壁在 X 轴中的坐标已确定，工件移动到使研抛轮处于槽上部正中的位置，如图 6－72（c）所示。

④研抛轮向下运动，对工件的槽表面进行对刀，如图 6－72（d）所示。

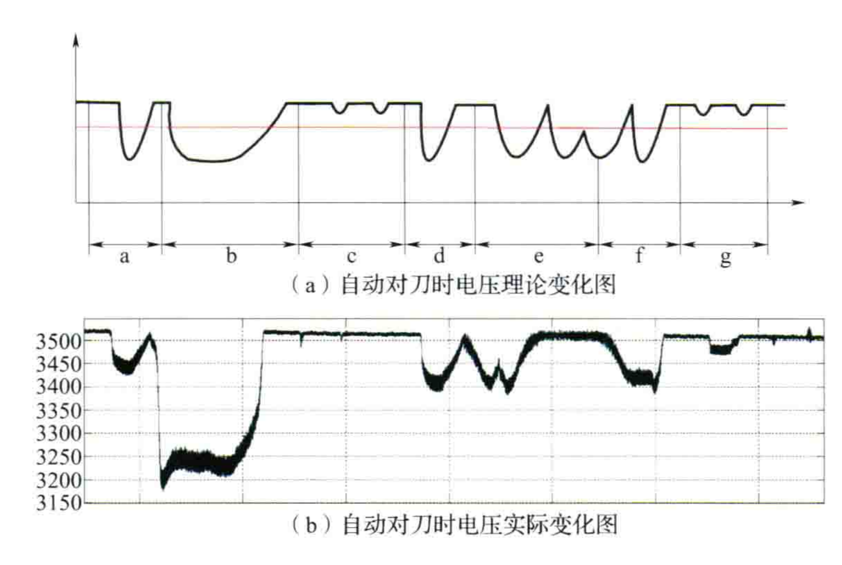
⑤槽表面对刀完成后，若研抛轮未与槽表面相切，则研抛轮缘上某处与槽边缘处于刚好接触的状态，使工件沿槽开口方向前后运动，寻找研抛轮最低点处与槽表面相切的位置，完成后，研抛轮与工件槽表面相切，确定了起始加工位置在 Z 轴的坐标，见图 6 – 72（e）。

⑥寻找最低点完成后，由于此时研抛轮与工件处于挤压的状态，所以研抛轮向上运动微小距离（程序中取为 10μm），重复一次简单对刀，确定了起始加工位置在 Y 轴的坐标。完成后研抛轮再向上运动 10μm，为下一步操作做好准备，见图 6 – 72（f）。

⑦工件再次做左右往复运动，对槽下部侧壁对刀，防止因槽的形状误差，即槽上部与下部的宽度不一致，致使研抛轮没有处于槽正中位置，造成对刀不准确，该步骤结束时，工件移动到使研抛轮处于槽下部正中的位置，确定了起始加工位置在 X 轴的坐标，见图 6 – 72（g）。

⑧对刀完成，起始加工位置的空间坐标完全确定，研抛轮向上抬起，准备放研磨膏，开始加工，见图 6 – 72（h）。

为进一步说明自动对刀的过程，图 6 – 73（a）参考前述部分对刀时实际电压变化图，给出自动对刀时，与上述步骤对应的反馈电压理论变化情况，图中字母分别代表自动对刀过程中的各步骤。c、g 段的侧向对刀中，由于夹具侧向刚度较大，所以其反馈电压变化较小。



（a）自动对刀时电压理论变化图

（b）自动对刀时电压实际变化图

图 6 – 73　自动对刀电压变化对比图

图 6 – 73（b）给出了实际对刀过程中微力感知夹具反馈电压的变化图，整个过程耗时约 6min。可见其变化趋势与理论变化一致，验证了该自动对刀程序的正确性。综述可得，自动对刀程序可在无需人工参与的情况下，在竖直方向和水平方向分别实现优于 0.1μm 和 1μm 的对刀精度，解决了研抛过程中难以在狭小的微结构空间内对刀的问题。

6.4.5.2　研抛工艺

（1）研磨膏粒度选择

研磨膏粒度的大小对于微沟槽加工结构有如下重要影响：

①由前述对刀的原理可知，对刀完成加入磨料后，由于磨料挤压在工件与研抛轮表面之间，使研抛力提前发生变化，缩小了研抛轮在 X 轴的运动范围，使槽底有可能未被完全加工；

②研磨膏粒度过大会引起研抛轮和槽侧壁的碰撞，使槽侧壁等非加工区域也被去除材料，破坏了槽侧壁的垂直度，并在槽根部形成圆角，影响了微结构的形状；

③与普通研磨抛光工艺相同，研磨膏粒度过大同样会使加工表面质量变差。

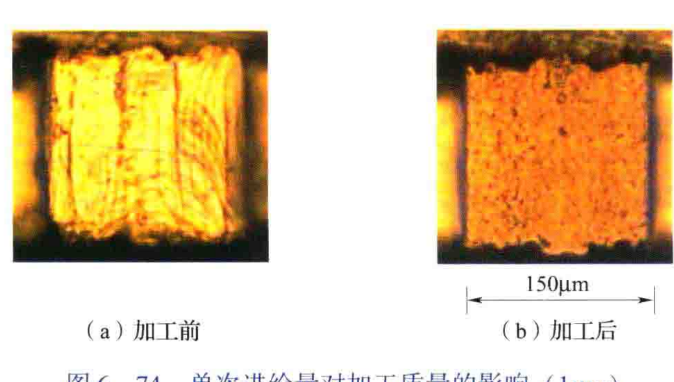
为保证加工质量，应使研磨膏粒度尽量小，但粒度过小导致加工效率降低，综合考虑平衡加工效率与加工质量之间的关系，选取合适的研磨膏粒度。

（2）研抛轮单次进给量

单次进给量主要影响研抛轮对工件的压力，增加压力可以有效地提高加工效率，但为防止对工件的薄壁槽结构产生破坏，在加工过程中产生新的表面变质层，研抛轮对工件的压力需控制在一定范围内。

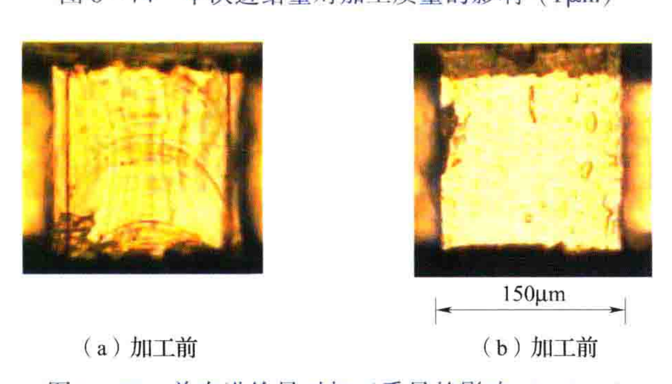
分别取单次进给量为 0.1 ~ 2μm 进行研抛试验，单次进给量小于 0.2μm 时，磨粒很少有机会在工件表面产生微细切削、挤压、摩擦等作用，在较短时间内观察不到材料的去除，研抛效率非常低；单次进给量大于 1μm 时，如果所使用的磨粒粒度小于 1μm，研抛轮表面和磨粒组成的加工工具与被加工表面之间只有很少的间隙，使得研抛系统的容屑、排屑、散热能力变差，不仅影响了材料的去除效率，也使得加工质量变差。

图 6 – 74、图 6 – 75 为用 W0.5 的研磨膏，单次进给量分别为 1μm 和 0.5μm 时所得加工结果的显微照片，可观察到单次进给量为 1μm 时，虽然去除了铣削加工的痕迹，但产生了很多的均匀分布的微细凹坑，形成了新的加工痕迹。单次进给量取 0.5μm 时，成功去除了铣削加工的痕迹，而且加工表面不产生新的加工痕迹。



（a）加工前　　（b）加工后

图 6 – 74　单次进给量对加工质量的影响（1μm）



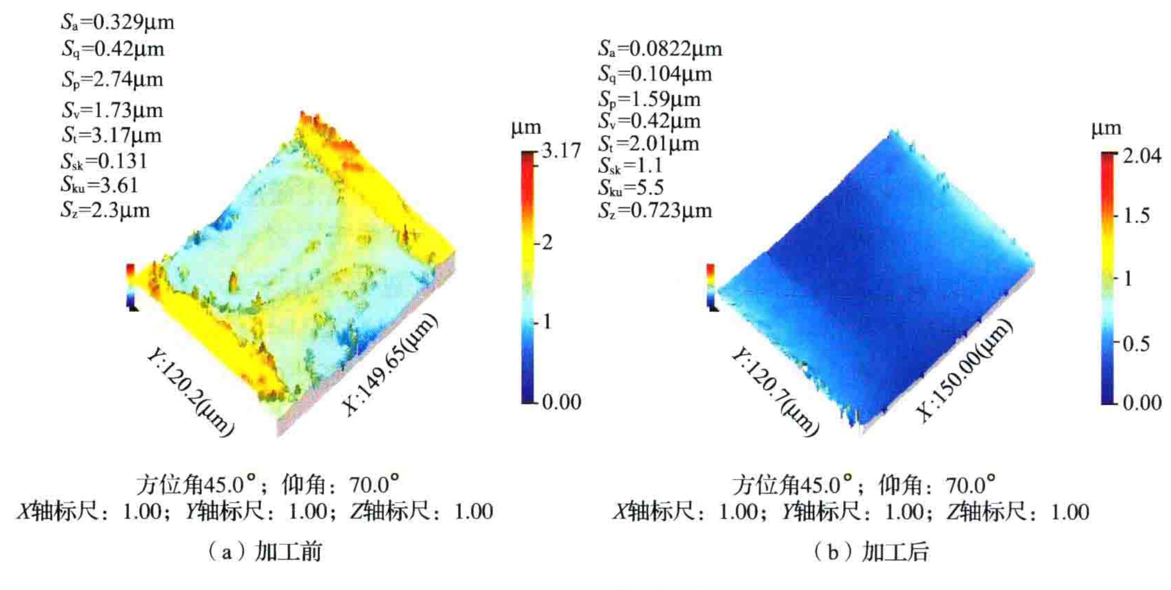
（a）加工前　　（b）加工前

图 6 – 75　单次进给量对加工质量的影响（0.5μm）

（3）研抛结果检测及分析

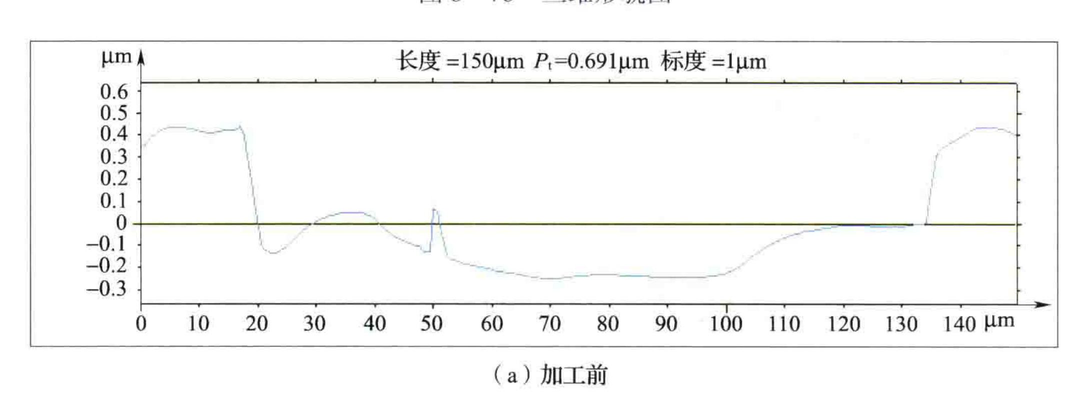
研抛结果的检测分析仪器为白光干涉仪，使用 10 倍放大倍率的物镜时，其水平方向分辨率为 1.7μm，竖直方向分辨率为 0.8nm。首先对加工前的工件进行检测，然后进行研

抛，研抛工艺参数为：研磨膏粒度 W0.5，工件主运动速度 2.5mm/s，副运动速度 0.03 ~ 0.3mm/s，单次进给量 0.5μm，总进给量为 4μm，研抛结束后再对工件进行检测，得到工件在研抛前后的三维形貌图及槽中心处 X、Y 方向的轮廓如图 6－76 ~ 图 6－78 所示。

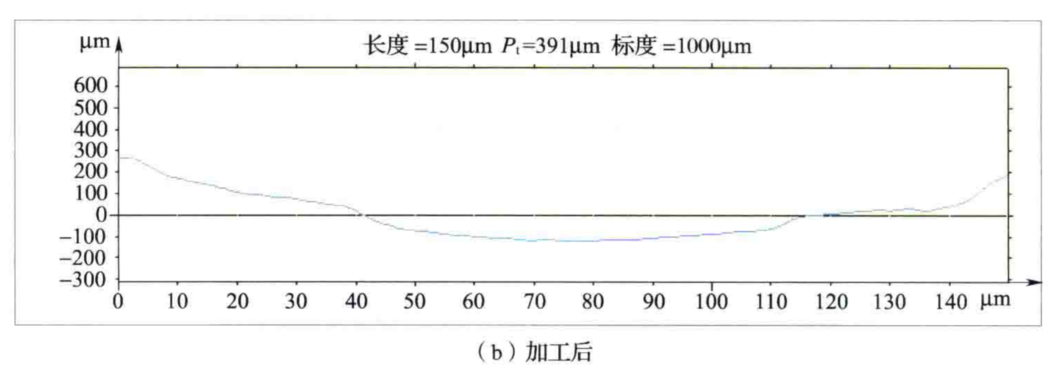


（a）加工前　　（b）加工后

图 6－76　三维形貌图



（a）加工前



（b）加工后

图 6－77　槽中心 X 方向轮廓图

从三维形貌图可见加工前工件槽两侧均有较明显的台阶，槽表面有铣削加工产生的半圆弧痕迹，槽表面的突起部分为残留表面的杂质；加工后槽表面铣削加工产生的痕迹已被完全去除，表面得到改善，其中 S_a 值由 0.329μm 降为 0.0822μm，S_q 值由 0.42μm 降为 0.104μm。

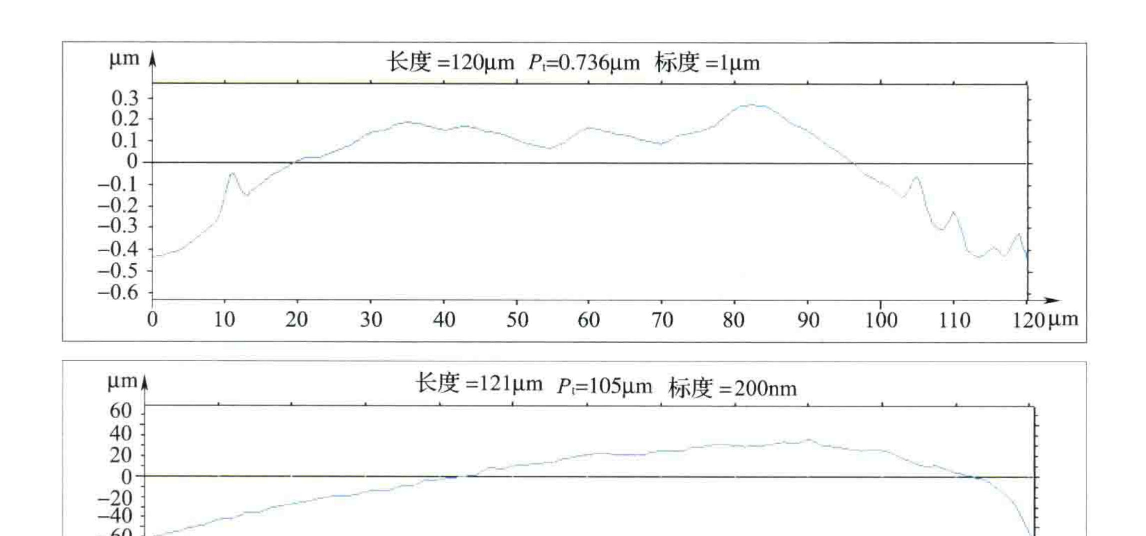


图 6 - 78　槽中心 Y 方向轮廓图

从 X 方向的轮廓图可观察到加工前槽两侧的台阶高度约为 0.5μm，轮廓 P_t 值为 0.691μm；加工后 P_t 值降为 0.391μm，槽两侧的台阶没有被完全去除，但台阶过渡变得较为平滑，呈圆弧形；

从 Y 方向的轮廓图可观察到加工前槽的结构为中间高两边低的鼓形，P_t 值为 0.736μm；加工后仍呈鼓形，但得到改善，P_t 值降为 0.105μm。

从上述分析可见，通过研抛后的工件有效去除了铣削产生的加工痕迹和表面变质层，改善工件表面形貌，提高了零件的使用性能。

6.4.6　超疏水微结构表面的设计与超精密加工

仿生学近年来得到了广泛关注和发展，例如利用昆虫眼原理制造的复眼透镜，由荷叶效应产生的自清洁仿生表面等。前面提到可通过两种途径实现自清洁效果：一种是采用低表面能的材料（表面能低于水）或厌水材料；另一种方法则是改变表面的微结构。前一种方法较易实现，但往往局限于较少的几种材料，如碳氟化合物、硅铜、氧化锌、二氧化钛等，同时，工程应用中这些材料有时并不能满足硬度或稳定性的需要。后者通过改变表面微结构实现自清洁效果的方法，应用更广泛。而超精密加工技术，则为实现这些微结构提供有效的加工手段。

6.4.6.1　超疏水表面理论模型

对于理想的光滑材料表面，通过深入研究物质表面亲水、疏水性，发现当液滴达到平衡时各相关表面张力与接触角之间的函数关系，可由杨氏方程来描述

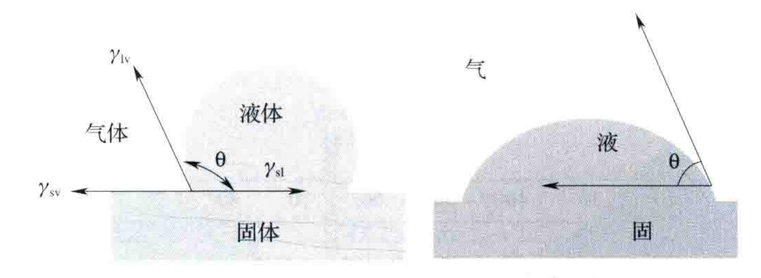
$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \qquad (6-4)$$

式中：γ_{sv}——固体表面在饱和蒸汽压下的表面张力；

γ_{lv}——液体在自身饱和蒸汽压下的表面张力；

γ_{sl}——固、液间的界面张力；

θ——固、液、气三相平衡时的接触角。



当 $\theta < 90°$ 时，表现为亲水性；$\theta > 90°$ 时，表现为疏水性。把 $\theta < 5°$ 的表面定义为超亲水表面；$\theta > 150°$ 的表面定义为超疏水表面。

对于粗糙的固体表面，同时需要考虑材料表面粗糙度对疏水性能的影响。温策尔（Wenzel）就在粗糙度对材料表面润湿性的影响开展了大量的研究工作，在此基础上对杨氏方程进行了修正：

$$\cos\theta_{w} = \frac{r(\gamma_{sv} - \gamma_{sl})}{\gamma_{lv}} \tag{6-5}$$

式中：r——固体表面的粗糙因子，是粗糙表面的实际表面积与外观表面积投影的比值。

卡西（Cassie）在研究材料表面疏水性能时提出了空气气垫模型，指出液体和材料的接触面由两部分构成，一部分是液滴与固体表面突出部分直接接触（f_s），另一部分是与空气垫接触（f_v），并假设水与空气的接触角 $\theta_v = 180°$，引入表面系数 $f = f_s/(f_s + f_v)$，推导出方程

$$\cos\theta_{c} = f\cos\theta + f - 1 \tag{6-6}$$

根据 Cassie 模型及公式的理论计算，提高气垫部分所占比例，将会提高材料表面的超疏水性能，Wenzel 模型和 Cassie 模型的提出，促进了人们对具有粗糙微结构的疏水性性能表面的研究，并为超疏水性表面的制备提供了坚实的理论基础。

6.4.6.2 超疏水微结构功能表面的构筑

构筑超疏水表面的一个非常重要的方法是在材料表面构造微观几何结构，其几何形貌、粗糙度、结构尺寸等都会对润湿性能产生影响。微结构表面设计是进行微结构表面制备及其润湿性能研究的基础工作。材料表面可以构建的微结构形貌有多种，比较常见的有平行光栅形微结构、圆形或方形孔微结构、圆柱或方柱阵列微结构以及锯齿状微结构，即类荷叶旋转抛物线形微结构、尖锋状突起微结构等。通过研究自然界具有自清洁效果的表面微结构如荷叶表面微结构，同时考虑采用超精密单点金刚石加工方式的可行性，需要对微结构特征进行简化设计。

（1）光栅阵列微结构模型

图 6－79 所示为光栅形阵列微结构模型，由图可见，其涉及到的几何尺寸参数有光栅宽度 a、光栅间距 b 和光栅槽深度 h。

根据 Wenzel 模型及式（6－5），可得

$$\cos\theta_{w} = \left(1 + \frac{2B}{1 + A}\right)\cos\theta \tag{6-7}$$

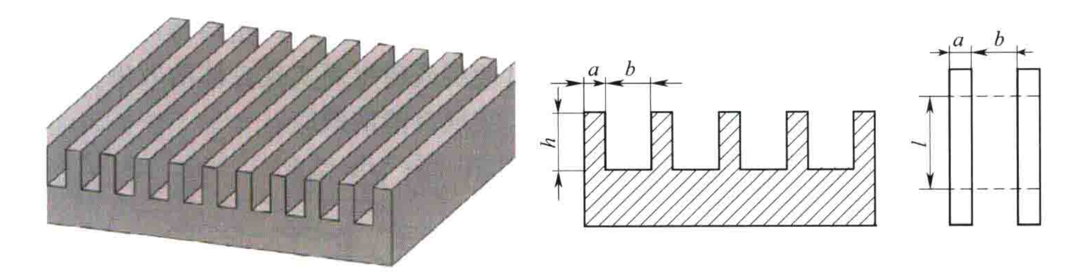


图6-79　平行光栅阵列微结构示意图

式中：θ_w——粗糙表面的 Wenzel 模式的表观接触角；

A——光栅间距与宽度比值，即 $A=b/a$；

B——光栅槽深度和宽度比值，即 $B=h/a$；

θ——原始接触角。

根据 Cassie 模型及式（6-6），可得

$$\cos\theta_c = -1 + \frac{1}{1+A}(\cos\theta + 1) \tag{6-8}$$

式中：θ_c——粗糙表面的 Cassie 模式的表观接触角。

（2）方柱阵列微结构模型

图6-80是方柱阵列微结构及几何参数示意图，方柱上表面边长为 a、方柱之间距离为 b、方柱高度为 h。

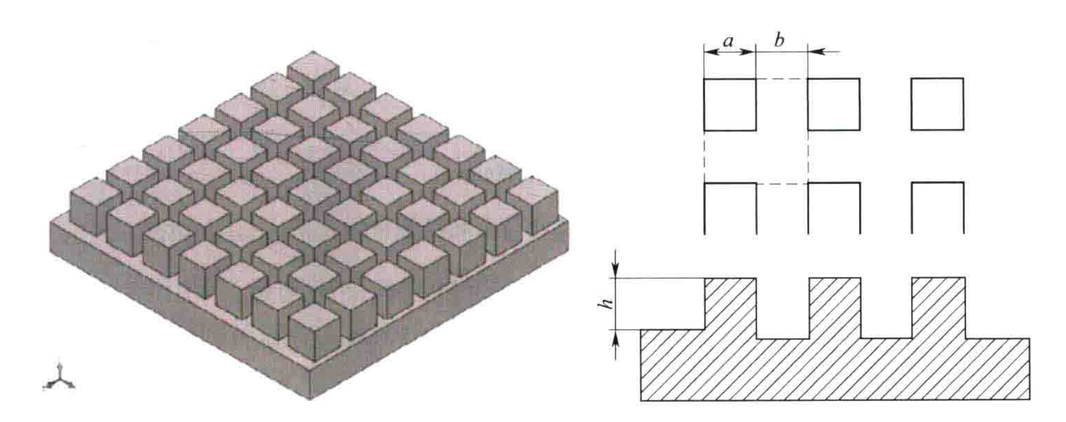


图6-80　方柱阵列微结构示意图

根据 Wenzel 模型及式（6-5），可得

$$\cos\theta_w = \left[1 + \frac{4B}{(1+A)^2}\right]\cos\theta \tag{6-9}$$

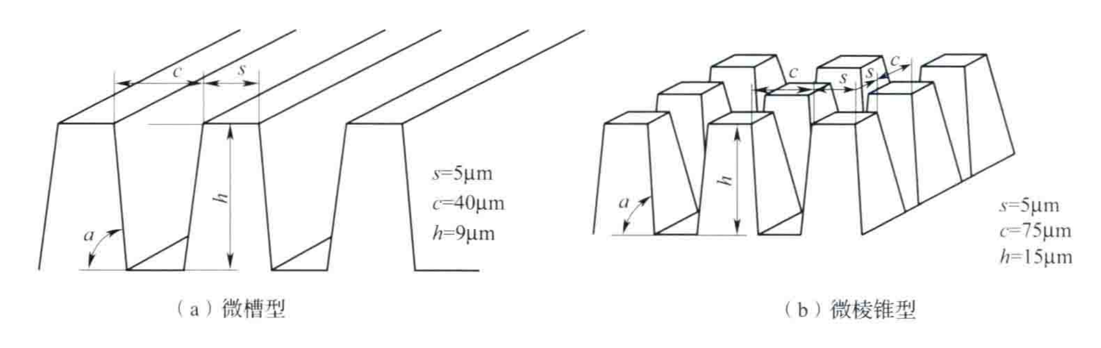
根据 Cassie 模型及式（6-6），可得

$$\cos\theta_c = -1 + \frac{1}{(1+A)^2}(\cos\theta + 1) \tag{6-10}$$

6.4.6.3　超疏水结构设计及加工实例

根据设计方法分别设计了两种微结构，为微槽型和微棱柱型，如图6-81所示。通过试验研究不同微结构尺寸与水滴接触角的关系，从而找到具有最大接触角的微结构尺寸，试验结果如图6-82所示。此外，通过超精密飞刀铣削加工生成微结构表面模芯，然后由

精密注塑生成具有微结构表面的塑料薄片，所设计及加工的微结构塑料薄片，具有光学效果，如透光性以及成像不变性。不同于目前通过镀层或喷层而实现自清洁效果，此项技术可用于大厦外墙以及汽车观后镜等方面的应用，实现自清洁效应。



（a）微槽型　　（b）微棱锥型

图 6-81　超疏水表面微结构设计

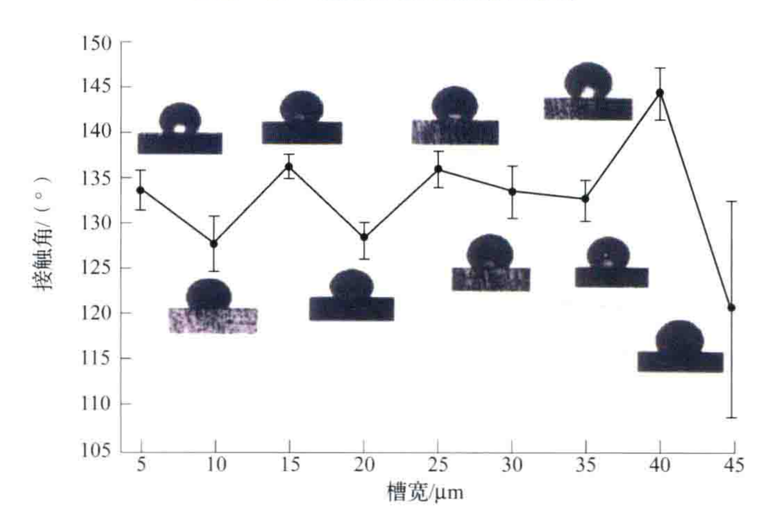
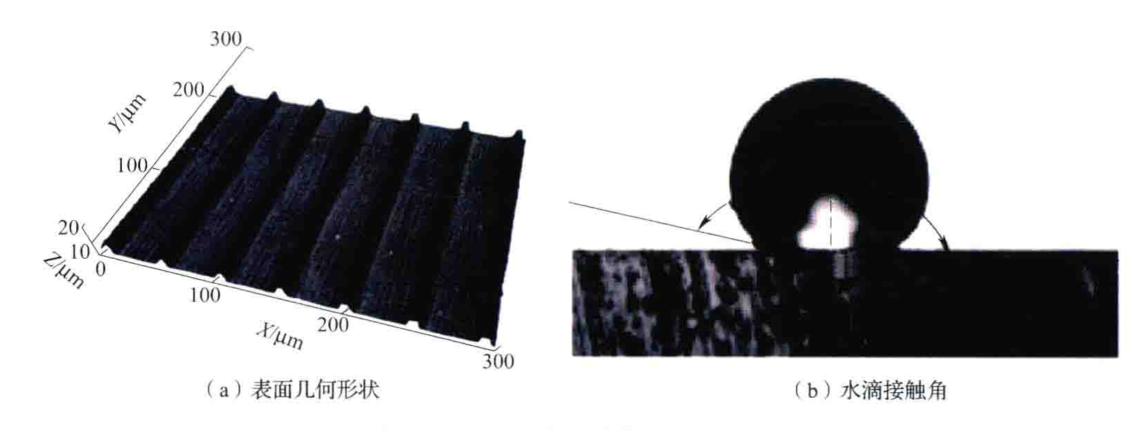


图 6-82　微结构尺寸与水滴接触角的关系

采用三维非接触式测量系统进行了微结构表面的几何面形测量，利用接触角测量仪进行水滴接触角度测量，结果如图 6-83 所示。材料为 PMMA 树脂材料，虽然 PMMA 为亲水性材料，但通过在其表面加工微结构，使得水滴接触角 θ 达到了 150°以上，从而为实现在亲水材料表面加工微结构产生自清洁效果提供了解决方案。



（a）表面几何形状　　（b）水滴接触角

图 6-83　超疏水微结构表面测试结果

第7章　航空典型零件的精密加工技术

7.1　叶片进排气边智能精密磨削及检测技术

7.1.1　概述

7.1.1.1　进排气边圆弧精度和一致性对航空发动机空气动力性能的重要影响

现代战机的发动机大多工作在极限条件下，因此当设计、材料、制造等方方面面都需要达到极限状态时，航空发动机的性能才能达到预期的要求。航空发动机制造工艺极其复杂，叶片是航空发动机中最为复杂和最为关键的零件之一，而进排气边圆弧则是叶片最为关键的部位，其精度和一致性对航空发动机空气动力性能有着重要影响。

以航空发动机为例，其进排气边和机匣封严将影响发动机动力约2%～3%，影响发动机推力约500kgf；而为提高发动机推力，需要提高涡轮前温度15～30℃，由此将导致涡轮寿命缩短至原来设计预期寿命的一半。有的发动机地面试车和常规空中试飞中，多次试验表现正常；但在快速拉升格斗等试验中，表现失常。经排故发现，导致飞机表现失常的原因是发动机压气机进排气边的曲率半径不符合设计要求。因此，提高叶片进排气边圆弧的加工精度与检测精度，将提升航空发动机总体性能、使用寿命和可靠性。

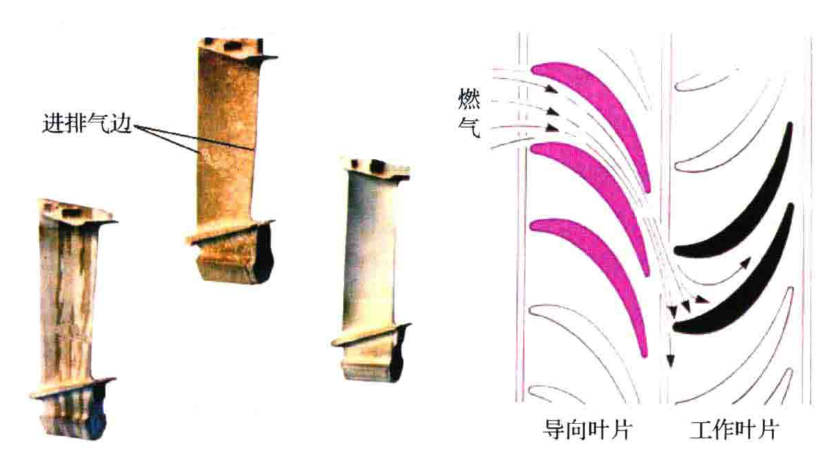


图7－1　发动机叶片工作图

现代航空发动机设计载荷越来越高，推重比越来越大。作为航空发动机的关键零件，叶片类复杂曲面零件的几何精度和表面质量直接影响着航空发动机的工作效率。对航空发动机这个“制造业的皇冠”而言，叶片更是“皇冠上的宝石”，叶片类零件的制造装备及关键技术代表着国家制造业的核心竞争力。

对航空发动机来说，叶片是决定其效率的一个重要因素。叶片型面、型线的设计期望是按照流体动力学规律获得更高的动力和更好的效率，即用更小的体积来获得更大的输出功率。这就导致叶片型面越来越复杂，叶片截面几何尺寸设计越来越轻薄，进排气边越来

越小，例如压气机叶片进排气边设计尺寸最小要求就达到了0.1mm；现代叶片制造精度要求越来越高，例如发动机叶片型面轮廓制造精度最高要求小于0.03mm。这些要求都对叶片的制造工艺和检测方法提出了新的挑战，不但对叶片加工与检测工艺的要求越来越高，而且对叶片加工与检测设备的要求也越来越高。

7.1.1.2 当前叶片进排气边制造检测工艺对航空发动机研制生产的瓶颈限制

航空发动机叶片的加工和检测有以下几个显著特点：

①叶片型面是空间自由曲面，每个截面的型线轮廓形状不尽相同，同时呈扭转上升状，这是叶片难以加工与检测的最主要原因；

②叶片的后缘部分相对厚度较薄，尤其是排气边的半径非常小，其最小叶尖半径小于0.1mm；

③叶片属于批产类零件，生产需求大，精度要求高。但是每个叶片零件需要采用单件制造工艺（非流水复制）的生产方式，生产效率低，加工精度难以保证。

航空发动机叶片叶身的制造工艺有精铸、精锻和切削加工等多种方法，但最终精密成型加工方法必须靠打磨抛光完成。目前，很多发动机叶片的加工工艺是：叶身采用精铸或精锻工艺，然后直接打磨抛光进排气边，完成加工流程。

通常航空叶片用难加工材料（例如钛合金、高温合金等）制造，采用砂轮磨削相当困难，这主要是由于：

①砂轮接触面积小，易磨损，需要经常修整，而且磨削效率低，表面质量不一致；

②对于复杂曲面，由于切削量变化较大，容易烧蚀工件甚至造成挤压破碎引起工伤事故；

③对曲面适应能力较差，砂轮为适应小的曲率半径必须做得很小，由此造成加工效率很低，不适合复杂曲面或大型叶片加工；

④对于钛合金、高温合金叶片，砂轮磨削容易造成组织微裂纹，造成安全隐患。相对砂轮磨削而言，砂带磨削具有易切削和“冷态”切削特性，不破坏机体组织，这对航空叶片抛磨加工尤为重要，砂带磨削是叶片磨削的发展方向。

目前，在国内航空发动机叶片生产现场，进排气边的打磨抛光主要靠技工手工完成，不仅工作效率低下，而且精度和一致性难以得到保证。进排气边的检测亦采用传统的人工方法，即边手工打磨抛光，边手工样板比对检测，检测精度只能靠此方法定性判断。这种加工检测方式已经持续了几十年，到目前为止生产方式依然如此。

发动机叶片人工打磨抛光和样板比对检测方法，在效率与精度一致性方面都急需提高，这种生产方式不能满足现代航空发动机的研制生产需求。而且，对现代发动机叶片而言，传统方法不能有效地检测进排气边的微小圆弧，叶片进排气边的检测是生产中的瓶颈环节。叶片的打磨抛光加工和样板比对检测耗费大量人工工时，生产环境恶劣，是航空发动机工厂中劳动强度大生产环境差的场所，与现代生产组织管理方式极不协调。

目前，国内航空发动机叶片最终检测（非加工过程中的检测）主要依赖于传统的接触式三坐标测量机。接触式三坐标测量机采用接触式测量，测量速度慢，测量效率低，在对空间曲面的测量上具有很大的局限性，对尺寸很小的零件特征（例如叶尖圆弧0.2mm的叶片进排气边缘等）的测量误差较大，甚至根本无法进行测量。而在国外，先进的叶片类零件测量采用光学测量传感器实现高精度高效率连续扫描测量。国外发动机叶片非接

触测量系统，可以解决叶片等复杂曲面类零件的精密测量需求。该技术是传统三坐标测量技术的发展，是接触测量向非接触扫描测量转变的技术创新，对发动机叶片的测量具有突破性意义。光学扫描非接触测量目前主要应用于发动机叶片的测量，其在航空航天、汽车、电力等领域也具有广泛的应用前景。

综上所述，航空发动机叶片生产亟需要现代先进自动化技术的发展推动。采用智能化的叶片进排气边精密磨削加工检测一体化技术，可大幅提高航空发动机叶片进排气边加工制造精度、效率和一致性，提高航空发动机的性能，同时可降低技术人员的劳动强度、改善劳动环境。

7.1.2　叶片进排气边磨削及加工技术发展现状

7.1.2.1　国内技术发展现状

目前国内发动机叶片进排气边加工绝大多数是由手工打磨抛光进行，加工过程中的检测靠截面轮廓样板比对方法，叶片加工完成后的最终检测多数采用接触式坐标测量机完成；传统的手工抛磨抛光和样板比对检测的方法已经用了几十年，但今天仍是我国发动机厂采用的主要方法。叶片进排气边无法准确定量测量，也是国内发动机工厂面临的相同难题。

随着计算机数字控制技术和磨削技术的发展，国内叶片数控磨削技术刚刚起步，叶片快速光学扫描坐标测量技术也在迅速发展，但智能叶片磨削加工测量一体化技术还是空白。

叶片型面的加工经历了从手工砂轮打磨、手工砂布打磨抛光、砂带仿形磨削等发展过程，目前最新的发展方向之一是多坐标数控磨削加工，如图 7－2 所示。虽然目前国内航空制造厂叶片进排气边加工仍主要靠手工打磨，但随着多坐标联动数控磨削技术发展迅速，这种方式将会成为叶片进排气边加工的主流方法。

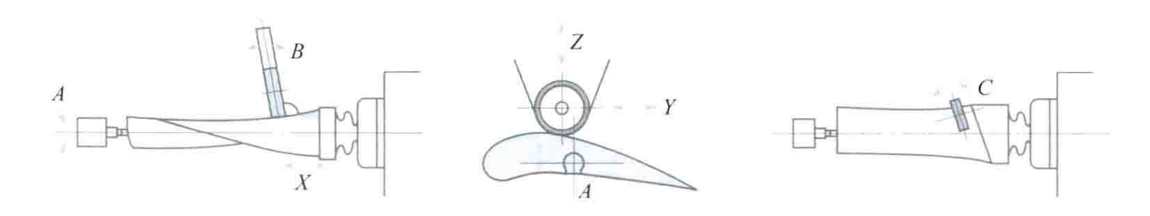


图 7－2　叶片磨削运动原理示意图

对于叶片型面加工而言，五轴叶片铣削能够精确加工出叶片型面。一般国内叶片加工企业均已购置了相应的五轴加工机床，加工空间轮廓精度可达 0.05mm 或更高，但数控铣削加工表面质量通常不能满足叶片的精度和性能要求，必须进一步打磨抛光。人工完成的打磨抛光工艺，受到操作者的经验、体力、情绪等多方面因素影响，其质量、一致性难以保证。手工抛磨作为叶片型面精加工手段已经成为了叶片行业的瓶颈，可采用多坐标联动磨削技术来解决精加工问题。

国内几家单位联合研制过叶片六轴联动数控磨床，主要加工对象为汽轮机大型叶片，主要解决大型叶片表面光整加工，如图 7－3 所示，对精度要求高的航空发动机叶片进排气边应用效果不佳，这主要是由于目前的数控磨削是基于理论模型参数的磨削，而不是基

于叶片实际测量结果的智能化加工。机械手砂带磨削及抛光也是目前叶片加工的一种方式，如图 7－4 所示。

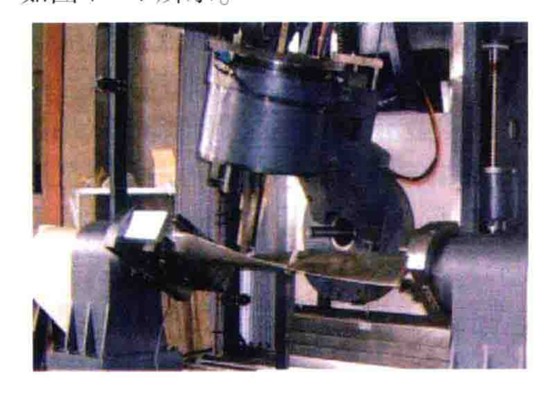




图 7－3　叶片六轴联动磨削



图 7－4　机器人砂带叶片磨削

强力磨削与随形抛光可以实现叶片快速修形和抛光。以强力磨削方式迅速去除大量磨削余量，修正前道工序的余量不均匀等。在强力磨削后，采用随动抛光，磨削沿曲面法向矢量方向浮动，满足随动抛光的要求。

叶片智能磨削加工测量一体化技术的核心技术之一是叶片的快速精密测量。传统的叶片样板比对测量方法不能实现数字化精确测量，而接触式三坐标测量机检测精度虽然可以满足要求，但测量速度太慢，不能满足生产效率要求。快速的光学测量方法很多（例如面结构光成像法、线光扫描法等），但普通光学测量方法通常不能满足航空叶片的测量精度要求。高效高精度的叶片数字化测量，是实现叶片智能数控高效磨抛加工的前提。

为了满足叶片快速精密测量的需求，国外开展了点结构光扫描坐标测量技术研究。点结构光扫描测量效率虽然比不上其他光学影像测量方法，但测量精度高于其它光学测量方法，综合性能可以满足航空叶片的测量要求。特别是点光测头可以测量叶片进排气边等微小零件特征，可以解决叶片进排气边的测量难题，对航空叶片生产现场面临的紧迫问题至关重要。

7.1.2.2　国外技术发展现状

近年国外发展的智能叶片加工检测一体化技术，极大推动了叶片制造技术发展，缩短了研制周期，推动了发动机研制生产。

国外叶片磨抛技术也经历了长期的发展演变。由于叶片型面曲线越来越复杂，精度越来越高，对加工设备及加工工艺要求也越来越严格。随着计算机数字控制技术和磨削技术的迅速发展，叶片型面的数控加工经历了从少坐标点成形到多坐标控制线逼近的发展过程，叶片型面的磨削加工经历了从手工砂轮打磨、手工砂布抛光、砂轮磨削加工、液压仿形磨削到多坐标数控磨削加工的发展，如今，叶片智能磨削加工测量一体化技术已经开始应用。

实现叶片智能磨削加工检测一体化，首先需要用光学扫描坐标测量方法快速测量叶身及进排气边形状，与标准模型对比得出每片叶片修整余量，根据每片叶片的检测结果，用智能磨削方法完成型面最终加工，达到自动化、高精度、高效率和高一致性的叶片加工。此项技术可以实现叶片轮廓精度 0.03mm，叶片进排气边圆弧半径小于 0.1mm，生产效率

比目前的手工方式显著提高，由于不需要定制检测样板，叶片研制周期大幅缩短。

罗罗和通用电气等多家航空制造企业采用了该项技术，其中罗罗公司的叶片柔性磨削加工检测一体化生产线，已经形成规模化生产能力，年生产叶片数十万片。

叶片最终加工靠手工打磨和最终检测靠样板比对，这种传统的叶片制造模式随着光学坐标测量机技术和智能数字化磨削技术的发展而被取代，叶片制造精度大幅提升和研制周期的大幅缩短。叶片制造精度的提升带来了发动机性能的提升，特别是叶片进排气边制造精度和一致性的提高，极大地提高了发动机效率和寿命。

国外叶片磨削技术已经开展了很多年，但智能磨削加工测量一体化技术应用的时间并不长。目前在叶片制造行业，国外已经开发出几种数控磨抛机床。德国IBS公司，英国施利亚当斯公司、罗罗公司，日本三菱重工业株式会社、松田精机株式会社，美国艾克塞罗公司等都开发了涡轮叶片磨削机床和汽轮机叶片磨削抛光专用机床。此类设备的共同点就是均采用多轴联动（基本都是六轴联动）数控磨削，另一共同点是除IBS公司作为商品销售之外，其余各家均是为汽轮机企业或航空发动机企业定向开发的产品，核心技术严格保密，且目前对中国市场限制。

以色列NexTec等公司联合开发研制的航空叶片自动化磨削加工生产线，采用了NexTec公司的光学扫描精密坐标测量机技术，利用机器人实现多轴联动磨削运动控制和叶片工位传递，在磨削专家系统协调控制下，完成叶片从测量到磨削的自动化全过程。此过程效率极高，单片叶片进排气边加工仅需要数分钟。如图7-5所示为NexTec等公司联合开发研制的发动机叶片进排气边智能精密加工与检测装置（ELE System）示意图，系统的工作顺序是：

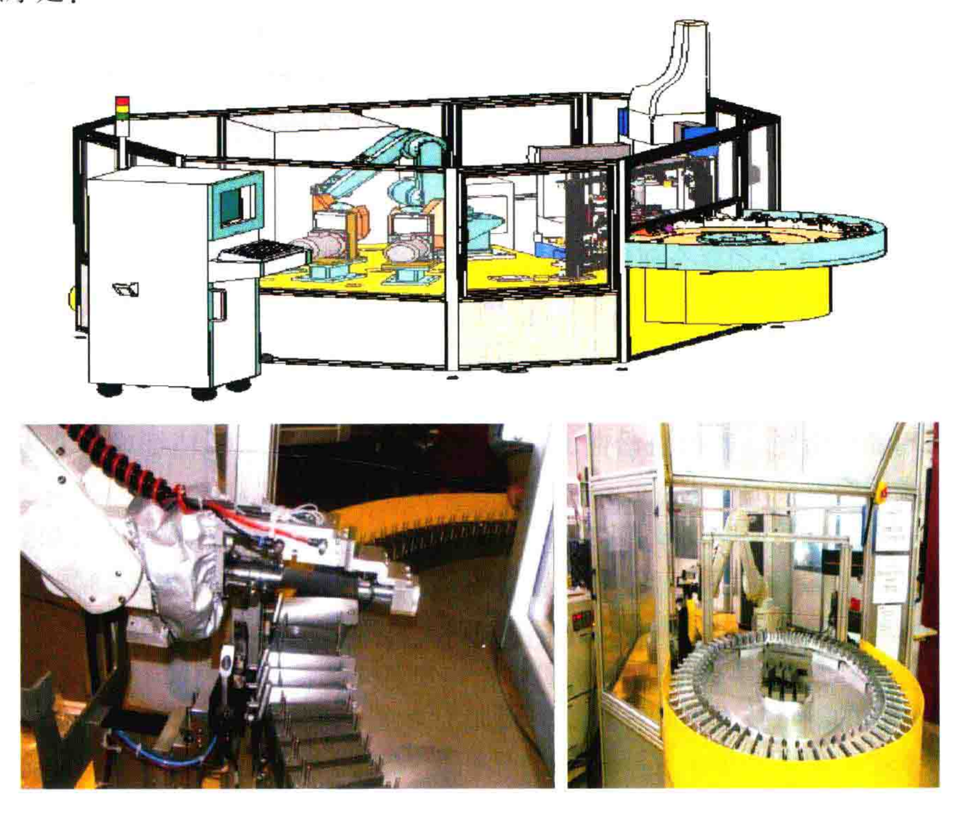


图7-5　叶片智能磨削加工与检测一体化技术装置示意图

①机器人从旋转机构上取下一个叶片。

②采用非接触测量对叶片几何特征进行扫描。

③根据扫描测量结果，在专家信息系统的支持下分析、判断、优化，自动编制进排气边磨削程序。

④把叶片放到磨削工位上，磨削叶片进排气边。

⑤机器人放回磨削后的进排气边。实现了叶片进排气边高效、高一致性、全自动检测。

该磨削系统被称为叶片磨抛加工的“交钥匙”生产单元，代表了当代叶片磨抛加工的世界先进技术水平。

7.1.3 叶片进排气边智能加工检测一体化关键技术

7.1.3.1 叶片进排气边高效磨削技术

叶片进排气边磨削技术包括以下三方面核心技术：

①叶片进排气边磨削装备整体设计技术；

②叶片进排气边高表面完整性、精密高效磨削工艺技术；

③叶片进排气边自适应磨削及自动编程技术。

多轴联动（通常是六轴或六轴以上）数控磨削是叶片磨削的特点，也是难点。利用机器人的磨削技术近年来发展迅速，将成为今后叶片进排气边加工的主流方法。

六轴联动双矢量控制技术是叶片磨削的关键技术之一。对于叶片进排气边磨削，砂轮与叶片表面是准线接触，为了获得准确的进排气边形状精度，必须同时控制接触线的矢量方向和运动进给方向。因此，叶片磨削必须采用法矢量和接触线双矢量控制技术，通过六轴联动实现磨削运动。六轴联动数控磨削的运动轨迹的生成方法，不能简单套用传统多轴数控加工系统运动轨迹生成方法，需要针对叶片磨削工艺的需求专门开发。

为了适应于柔性制造单元，叶片进排气边磨削装备在整体设计上，包括生产线搭配、接口匹配及系统同步技术等。

以色列 NexTec 等公司联合研制的航空叶片自动化磨削加工单元，利用机器人实现多轴联动运动控制，利用两个磨削主轴头，分别磨削叶片叶盆和叶背表面边缘，从而全自动化完成进排气边的磨削全过程。此过程效率高，进排气边一致性好，工艺先进。

强力磨削与随形抛光是叶片磨削的两个过程。强力磨削迅速去除磨削余量。在强力磨削过后，采用随形抛光，砂带机沿曲面法向矢量方向浮动，实现精细成型和表面光整加工，达到高表面完整性的要求。

叶片进排气边自适应磨削及自动编程，要求数控磨削系统具有敏锐的感知能力、智能控制能力和人性化的编程能力。针对叶片模型及坐标定位，自动开展多轴磨削路径规划，实现进排气边复杂曲面的自动编程，根据最优工艺参数，生成数控加工程序。

7.1.3.2 叶片曲面的光学扫描快速测量技术

精密、快速的测量技术是叶片智能磨削加工测量一体化技术的基础，也是航空发动机叶片制造技术中的瓶颈环节，光学扫描坐标测量方法是叶片精密快速测量的最佳技术途径。

目前国内自主研发的高精度光学扫描测量技术还处于起步阶段，尚未达到工程实用的

要求。国内市场上光学坐标测量装备主要依赖进口，国外高精度叶片测量装备对我国军工制造企业封锁和禁运。叶片光学扫描测量技术主要包括以下核心技术：

①基于环形激光的测头传感器技术；

②测量装备整体设计制造技术；

③测量运动数控系统和评价软件技术。

高精度光学扫描坐标测量核心技术之一是精密光学测头传感器技术。以色列 NexTec 公司的激光点扫描测头采用环形光三角法成像原理，具有适应性强、精度高等独特技术优势。该测头主要包括以下几方面核心技术：激光光束点控制技术、点视觉成像匹配与标定技术、光学测头非线性误差分离与补偿技术、光学测量的高速响应与数据处理技术、机电一体小型化集成技术等。NexTec 公司的环形三角法光学测头（WIZ-probe）原理图和外观图如下图所示，该测头拥有多项专利，性能指标达到世界领先水平，测量精度可达 2μm。

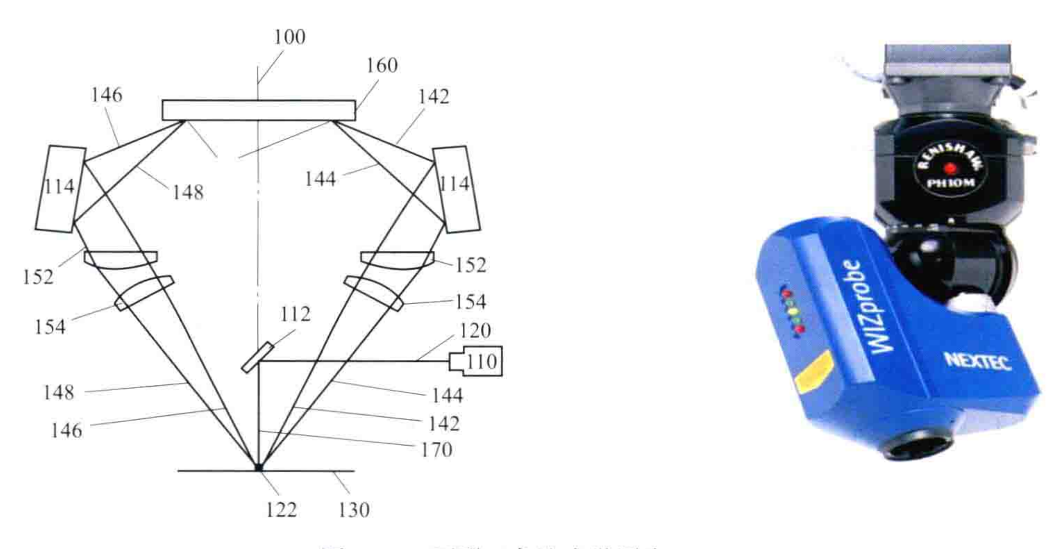


图7-6　环形三角法光学测头（WIZprobe）

该测头采用了多项专利技术，包含的专利技术有：测量物体形状的非接触式方法（Non-Contact Method for Measuring the Shape of an Object）；评估光学测头精度的方法（Method for Estimating the Accuracy of an Optical Probe）；形状测量的校准过程（Calibration Process for Shape Measurement）。NexTec 公司以此三项专利为基础，开发出了系列适用于叶片测量的光学扫描测头。

光学扫描测量装备整体设计技术是叶片快速精密测量的关键技术之一。复杂曲面测量有多种方式，笛卡儿坐标系三坐标测量是最常用的方式。光学坐标测量机要求运动敏捷、精度高、动态性能好；信息同步获取技术、光轴矢量空间标定技术等都是光学坐标测量机需要突破的关键技术。相比传统的接触式坐标测量，高测量精度是光学坐标测量的弱点，也是难点。对光学坐标测量而言，通盘考虑机械、电控、软件、测头等诸多因素的协调搭配至关重要。

光学扫描坐标测量运动控制与评价软件技术是实现智能化测量的核心技术，国内普通的坐标测量机市场，数控系统和软件已经全部被国外产品垄断。国内开发的测量机数控系统和测量评估软件，在功能完善性、可靠性等方面，与国外同类产品有较大差距。

NexTec 公司的坐标测量机运动控制系统和测量软件（WIZblade 和 WIZinspect），具有国外同类产品类似的功能和性能，对航空叶片等精密复杂零件测量尤其适合。特别是该系统可以集成到叶片进排气边智能加工测量一体化技术单元中，这正是发动机叶片测量所必须的。

7.1.3.3 叶片进排气边智能加工测量一体化技术

叶片进排气边智能加工测量一体化技术是多种现代科学技术成果的集成，包括加工、测量和机器人技术等。除了上面提到的叶片数控磨削技术、光学扫描坐标测量技术外，核心技术内容还包括：

①测量加工一体化系统集成；

②机器人六自由度运动控制与精密定位；

③基于测量评价的补偿加工技术。

叶片进排气边磨削加工测量一体化技术系统组成如下图所示：

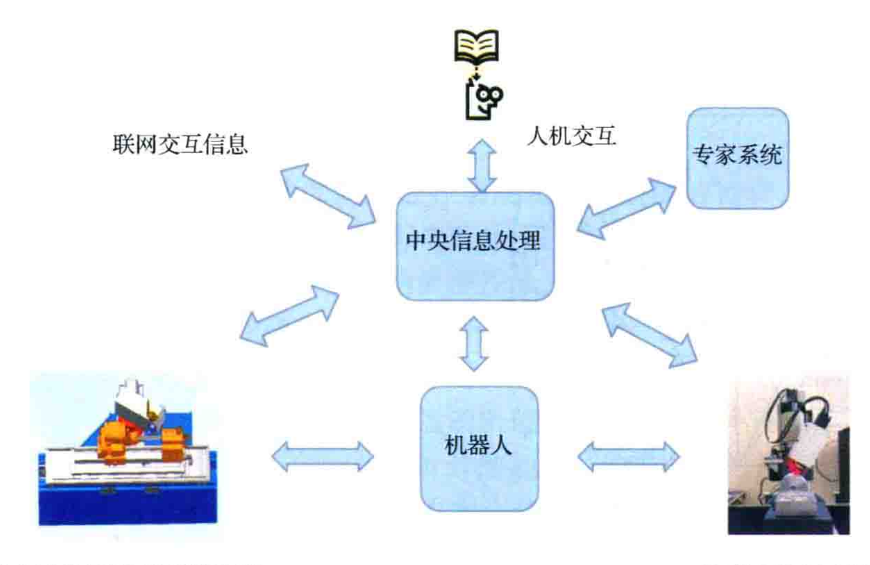


图 7－7　叶片进排气边智能磨削加工测量一体化技术系统原理图

NexTec 公司的叶片进排气边智能磨削加工测量一体化技术（ELE System），集成了叶片进排气边磨削技术、快速精密测量技术、机器人系统、工件精密传送与定位及智能专家控制系统等。通过光学扫描坐标测量方法快速测量叶片，根据每片叶片的检测结果，用柔性自适应磨削方法完成进排气边最终加工，达到自动化、高精度、高效率和高一致性的叶片进排气边加工。

加工测量一体化系统集成需要对系统进行总体设计。进排气边智能磨削加工测量一体化系统在专家系统支持下，完成叶片原始数据采集、测量数据分析、磨削工艺参数制定、磨削运动控制和磨削加工质量判断等全过程。该项技术需要进行系统性设计，既要考虑系统组件的功能、性能和精度，也要考虑系统的兼容、协调与匹配。该系统的设计需要建立在充分的工艺试验基础上，在掌握了必要的工艺知识后，才能形成该套系统的中枢“专家系统”。

机器人六自由度运动控制与精密定位技术在叶片进排气边智能加工测量一体化技术单

元中起核心作用。通过机器人六自由度运动控制，满足叶片进排气边复杂磨削轨迹规划和姿态调整的需求，通过精密定位技术，辅以专用工装，满足在线检测和二次装卡精度需求。

基于测量评价的补偿加工技术是叶片进排气边智能加工测量一体化技术的关键特色。该技术把叶片检测数据与设计模型对比，得出每片叶片需修整余量，用自适应磨削方法完成加工成形和最终表面光整加工，达到自动化、高精度、高效率和高一致性的叶片加工，可以实现叶片制造精度 0.03mm。

7.2　发动机燃油喷嘴组件的精密制造与测试技术

7.2.1　概述

国务院印发的《中国制造 2025》中明确地提出：突破高推重比、先进涡桨（轴）发动机及大涵道比涡扇发动机技术，建立发动机自主发展工业体系。其中的大涵道比涡扇发动机是我国民用发动机未来发展的重要方向，加快国产民用发动机的研制，让国产大飞机装上“中国心”已经刻不容缓。

燃油喷嘴组件（以下简称喷嘴，如图 7－8 所示）是影响发动机性能的微小、复杂、精密结构件之一。作为发动机中具有代表性的关键构件之一，喷嘴具有结构精密、技术要求高、制造工艺复杂等特点，其典型特征包括微孔、微槽、微锥等。喷嘴的关键零件（如副喷口、旋流芯、柱塞等）的尺寸结构一致性、尺寸配合精度等特性都对民用发动机燃烧室的工作性能、燃烧效率及可靠性有直接且重大的影响。例如，喷嘴的雾化锥角的大小与精度就会对发动机全寿命周期内的雾化质量有着十分重大的影响。若喷嘴的雾化锥角过大，粗大的雾滴将穿过燃气直接打到火焰筒内壁，引起壁面过热和积碳，更严重的会造成火焰筒内壁面受热而剧烈变形；若喷嘴的雾化锥角过小，油滴将集中在火焰筒中心区，会造成中心富油，燃烧不完全、不充分。这两种情况都会造成喷嘴组件的工作稳定性和工作一致性的降低，从而导致发动机燃烧室的工作性能和燃烧效率降低，增加发动机耗油量。





图 7－8　燃油喷嘴组件

要提高航空发动机燃烧室的工作性能及燃烧效率，就必须对喷嘴提出更高的要求：

①宽广的流量范围内雾化质量良好；

②能够快速响应燃油流量的变化；

③全寿命周期内具备稳定的性能；

④不同工况下工作一致性好；

⑤能耗尽可能降低；

⑥设计的灵活性进一步提高。

民用发动机喷嘴的研制需求集中体现在高一致性、高可靠性和高性能等方面，这就需要喷嘴的高精密制造、高效检测和高可靠性测试等方面满足技术成熟且工程化应用程度高的要求。

但是，在当前喷嘴的研发过程中，以上各项要求却难以得到全部满足。究其原因，就是目前我国在制造一致性、加工效率、测量精度、测试方法和生产成本控制等方面与国外的水平存在较大的差距，尚无法解决从工作机理研究到关键件的确定性制造与精密检测、再到局部或整体性能的精密测试与准确分析的喷嘴全研制流程各环节的瓶颈难题。例如，喷嘴关键特征（如旋流槽流道边缘形状）难以精确控制，手工去除微细毛刺不彻底，关键零件的加工精度不达标；诸多关键尺寸无法测量，成品质量控制仅靠手工筛选配对，一致性极差，整体性能无法保证；加工效率低、生产成本高等。

7.2.2 喷嘴精密加工及检测技术国内外发展现状

7.2.2.1 喷嘴精密加工技术

高精度的航空发动机喷嘴设计及生产要涉及加工、检测、测试、试验等多项技术，喷嘴的加工制造技术直接决定着喷嘴的性能与质量。由于喷嘴零件的尺寸小、结构紧凑，且主要采用不锈钢、高温合金、高强度钢等难加工材料，因此加工难度大。

目前，世界上仅有美、英、法等少数国家掌握喷嘴零件的核心制造技术，并在制造加工方面建立起完备的技术体系。美国的帕克公司、达信公司，北欧的萨伯集团，英国的尤尼森公司等喷嘴供应商均具备独立的设计、制造及测试能力，已经广泛使用智能化加工装备和先进的加工工艺来制造各种型号的精密喷嘴，能够有效地保证尺寸精度与产品性能的一致性，其制造水平一直处于世界领先地位。

为满足民用发动机喷嘴组件上大量 $\phi 0.3$mm 的高精度微小孔（技术要求：粗糙度 $Ra0.4\mu m$，硬度 HRC55，材料 9Cr18）的制造需求，国外厂商如德国迪特尔公司、霍恩公司等均研制了最小直径 $\phi 0.17$mm 的微细镗刀；瑞士迈克伦公司、德国 HTT 公司均可定做 $\phi 0.3$mm 的微细枪钻。上述四家公司均能够提供如 $\phi 0.3$mm 的高精度微小孔的加工刀具及解决方案。

为进一步提升喷嘴加工制造的效率及质量，国外还开展了喷嘴的增材制造技术研究，并取得了一定成果。如图 7 - 9 所示，通用电气公司通过激光增材/减材组合技术研制的 LEAP 发动机采用 DMLM（直接金属激光熔化）技术来实现对喷嘴等关键件的加工。与传统金属切削机床的制造方式不同，DMLM 技术主要是根据 CAD 文件，由激光或电子束逐层熔融细金属粉末制造指定的零部件，并最终生成复杂、致密的零部件，大大节省材料和时间。以激光增材制造的方式，预期到 2020 年可使喷嘴的年产量从 1000 个增加至 40000 个。而激光增材制造技术或将应用到发动机的其他组件中，彻底改变未来发动机的制造模式。



图7-9　通用电气采用激光增材制造技术生产的LEAP发动机燃油喷嘴

国内在民用发动机喷嘴加工制造方面虽然开展了一些研究工作，但国内发动机主机厂的喷嘴加工仍存在生产工序冗长分散、加工技术难以满足设计要求的问题。当前，国内喷嘴加工制造领域普遍存在以下技术难题：

（1）加工质量一致性差

由于存在着机床性能参差不齐、异形刀具研制难度大、微小零件装夹难度大、重复装夹定位精度低等影响加工过程的诸多不利因素，旋流槽轮廓度等部分关键尺寸又缺乏确定性检测技术的指导，加工精度只能依靠加工工艺与机床精度保证。虽然加工出来的零件偶尔能够符合设计要求，但是批量生产零件的稳定性和一致性很难保证，质量控制难度大。

（2）毛刺去除难度大

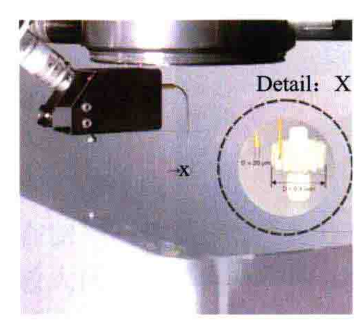
针对内部深小孔毛刺，目前大多采用电解、高压水流、磨粒流等方法去除，ϕ1mm以下的微深小孔的内部毛刺极难手工去除。针对外部毛刺，主要采用手工方式去除，不但费时费力，而且质量参差不齐，常常造成毛刺去除不彻底或去除过量而导致流道边缘塌边、受损，更无法满足保持锐边的特殊要求。

除采用传统加工方式外，国内的部分高校、科研院所也在民用航空精密微小关键零部件的激光增材/减材制造方面开展了相关技术研究，如西安交通大学研究了空心涡轮叶片制造；清华大学和北京航空制造工程研究所采用电子束制造飞机用的金属零件；华中科技大学、北京隆源公司、中国机械科学研究院研究了喷嘴壳体的铸造等。但是，国内在激光增材制造成形民用航空精密微小关键零部件后，还需要转移至其他数控设备上进行二次机械加工，并没有将激光增材制造技术与传统精密切削（减材）技术集成到一起，这就与国外在加工效率、加工精度上存在着较大的差距，也降低了喷嘴类微小零件的加工精度及性能质量。

7.2.2.2　喷嘴检测技术

在几何尺寸检测方面，国外自20世纪60年代就开始对类似喷嘴的微小零件进行了各种检测技术的探索研究。截至目前，已经在微小零件的检测技术方面取得了许多成果。例如，美国专业生产航空航天喷嘴的厂商National Jet公司能够成熟地应用带有尼康镜头的光学非接触检测装置对其加工的微小孔进行高效精密测量，并将喷嘴的检测定义扩展到综合寿命特性测试。又如，德国的沃恩公司已研制出最小测头半径仅为10μm的接触式光纤传感器测头（Fiber Probe WFP 3D），微接触力不超过1μN，能够实现微小零件的全外观尺

寸及轮廓的自动扫描和测量，可以实现数据的快速采集，且双球测杆技术能够排除微小尺寸边缘阴影导致的成像误差，特别适用于喷嘴的微观几何尺寸测量。图 7－10 是沃恩公司的光纤测头对喷嘴零件测量的实例。



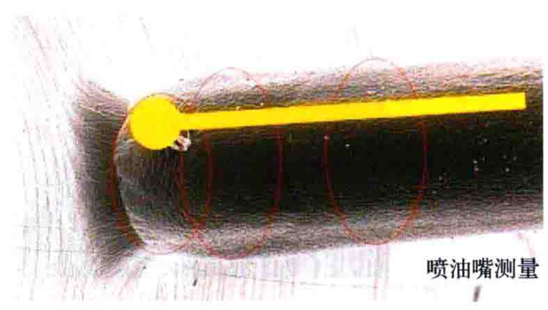


图 7－10　德国沃恩公司的光纤测头对喷嘴测量的实例

从 20 世纪 90 年代起，国内发动机主机厂所陆续进口了一批先进数控设备，建立了喷嘴的生产线。为解决喷嘴生产线的零件尺寸检验与质量控制等问题，部分发动机主机厂所配备了三坐标测量机、通用量具和一些简单的测量工装。但是，这些测量工具与设备无法对喷嘴核心零件的一些关键或重要的特征尺寸进行高精度、快速、定量的测量，甚至对某些典型特征完全无法检测，而只能通过定性检测及修配测试来筛选出合格的喷嘴零件。

综上所述，国内与国外在喷嘴的制造一致性、加工效率和生产成本等方面都存在着较大差距，在喷嘴加工制造、检测和性能测试技术方面还处于相对落后的水平：喷嘴零件加工制造一致性差、毛刺去除困难；喷嘴检测大多依靠整体组装后的修配、无法获得典型几何特征的确定性参数；喷嘴局部性能和整体性能的测试缺乏全面的、有效的、工程化的手段。国内不但没有成熟的技术应用到民用发动机制造工程中，尚无法解决喷嘴关键零件的精确制造与确定性检测，也不能准确获得喷嘴的局部性能、整体性能与结构尺寸及其精度的映射关系。

7.2.3　喷嘴精密加工及检测关键技术

7.2.3.1　喷嘴精密制造和测试技术总体研究思路

通过喷嘴典型特征的高一致性精密制造工艺及优化技术、基于光学测量的非接触快速精密检测技术、喷嘴组件的局部性能与整体性能的测试及仿真技术、喷嘴壳体增材/减材组合制造工艺技术等研究工作，将喷嘴的高一致性精密制造工艺、高确定性精密检测与高可靠性性能测试等技术有机结合，形成分布式一体化试验平台与专用工装，较彻底解决喷嘴制造一致性差、加工效率低、检测能力弱、测试方法少、生产成本控制难的关键问题，从而为制造出满足高性能、高一致性和高可靠性要求的发动机喷嘴组件提供坚实的基础技术，如图 7－11 所示。

喷嘴组件的精密制造和测试主要涵盖以下关键技术：

①高硬度典型微特征的精密制造技术和微观毛刺去除及流道边缘形状精确控制技术：攻克细长哑铃中空零件的微应力精密磨削技术，完成对喷嘴微小典型结构的精密加工制造；

②喷嘴壳体的增材制造工艺技术：揭示增材制造过程中成形与应力控制规律，掌握组织性能控制方法，达到喷嘴壳体结构工艺一体化；

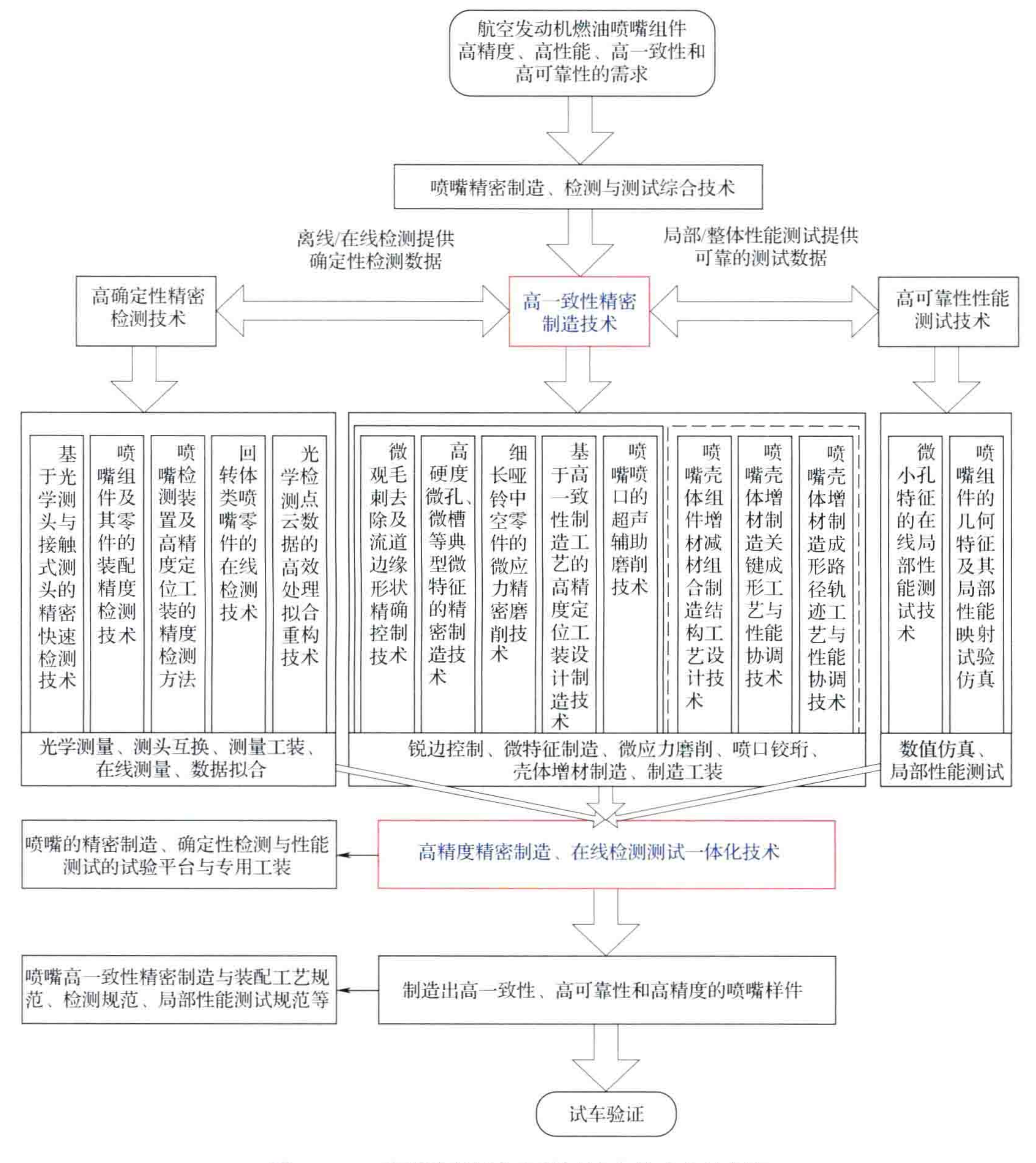


图7-11　喷嘴精密制造和测试综合技术总体框架

③基于光学测量的精密快速检测技术：攻克回转体类喷嘴零件的在线检测技术，实现对喷嘴关键尺寸结构的确定性检测；

④性能测试方法：突破微小孔类特征的在线局部性能测试的关键技术，并完成喷嘴组件的几何特征及其局部性能映射试验仿真研究；

⑤喷嘴加工、检测和测试的工艺规范编制：实现批量制造高一致性、高可靠性和高精度的典型喷嘴。

7.2.3.2　燃油喷嘴组件增材/减材组合制造结构工艺设计技术

燃油喷嘴组件体积小、结构紧凑、零件的尺寸精度要求高，生产制造、装配调试等工艺复杂冗长。例如，某发动机喷嘴共有近20个零件，其工艺是先单独加工各个零件，再采用

真空钎焊、氩弧焊、激光焊接等手段分多次焊接形成喷嘴组件，加工过程中存在以下难题：

①喷嘴壳体为高温合金材料模锻件，制造成本高、周期长、余量分布不均匀；

②深小孔的长径比大，深孔尺寸精度要求高，采用传统切削方法加工这一特殊的深小孔结构困难，刀具易磨损崩刃、加工成本高、加工质量差、效率低；

③深孔的真空钎焊难度极大，而且焊接后的喷嘴壳体组件的结构强度与耐用性很差。

增材制造技术近年来得到了迅猛发展，对于喷嘴壳体组件也可采用增材/减材组合制造结构工艺设计技术进行工艺优化，其中重点是要解决喷嘴壳体组件既有工艺中存在的模锻件成本高、周期长、深小孔加工及真空钎焊难度大等瓶颈问题。

（1）激光增材及切削减材组合制造工艺规划技术

基于增材制造及切削加工的优缺点，合理规划激光增材及切削减材的工艺次序和加工内容，采用增材建模设计方法降低组合件的结构复杂性、制造复杂性和装配复杂性，并进行零件性能提升和减重设计；采用切削减材方法对增材制造得到的典型结构进行二次加工，以提升喷嘴的加工质量、可靠性及其长期工作性能的稳定性，提高喷嘴全寿命周期内的燃油雾化质量，为优化改进典型微小精密组件结构提供技术支撑。

以喷嘴壳体组件制造为例，其增材和减材制造技术路线如下：先采用增材技术形成喷嘴的毛坯件，在喷嘴壳体毛坯件中直接形成采用常规机械加工难以形成的内部空腔结构，且此时壳体外部形状和尺寸已经接近最终的产品要求，极大地降低加工难度和加工余量；再在增材毛坯的基础上进行减材加工，形成燃油进油口和喷嘴精密件安装腔，用来安装和固定包含喷嘴旋流芯、喷孔等精密组件，最终完成喷嘴整体精密组件的加工制造过程。

（2）喷嘴结构的一体化轻量化拓扑优化设计技术

激光选区熔化技术的成形原理可以实现一体化轻量化的设计要求。因此，通过喷嘴参数的结构优化设计，特别是优化内部流道路径和尺寸结构，实现部分结构的一体化成形，提高零件的可靠性，减少加工工序和制造周期。

以薄壁细长管的加工为例，原有工艺中的薄壁细长管和喷嘴杆壳体均采用钎焊连接，加工制造难度非常高，成品率也受到限制；通过喷嘴壳体组件结构的新型设计，可以实现空腔结构的一体化成形，采用激光增材及切削减材组合制造工艺加工喷嘴壳体样件，降低制造技术难度。

（3）精密增材制造关键成形工艺与性能调控技术

GH4169 材料是一种广泛应用的镍基材料，由于熔点高且合金化，粉末材料在选择性激光熔化（SLM 成形）过程中容易会发生飞溅、球化、热变形等现象，会引起成形过程不稳定、成形组织不致密、成形精度难以保证等问题。针对镍基材料的特点研究激光功率、扫描速度、扫描间距、扫描路径、分层厚度等工艺参数对 SLM 成形过程中熔池行为特征、内部缺陷、应力变形以及尺寸精度的影响规律，探索镍基材料 SLM 成形内部缺陷、应力变形与尺寸精度控制方法。

（4）精密增材成形路径轨迹规划优化与应力变形控制技术

喷嘴壳体组件包含大深度薄壁结构、空腔、实心悬臂和内部流道，这些结构的激光扫描过程都会产生能量和残余应力的局部富集。因此，针对以上特定结构的分区扫描路径规划是结构件成形的关键技术。复杂金属零件在 SLM 成形过程中存在的主要问题是应力变形及内部缺陷，需要深入研究成形过程的应力变形和成形件内部的缺陷等关键技术。

7.2.3.3 喷嘴典型结构特征的高一致性精密制造工艺及优化技术

喷嘴典型特征的高一致性精密制造工艺及优化技术路线如图 7－12 所示，主要研究内容包括开展高硬度（HRC50）微孔、微槽等典型微特征的精密制造技术，同时开展航空发动机燃油喷嘴喷口的超声辅助磨削技术研究，为高硬度微孔精密制造、微应力精密磨削提供技术支持；采用微观毛刺去除及流道边缘形状精确控制技术、微应力精密磨削技术解决流道边缘形状精确控制、微观毛刺去除等技术难题；研究细长哑铃中空零件的微应力精密磨削技术降低喷嘴零件磨削过程中的磨削力及零件变形量；开展基于高一致性制造工艺的高精度定位工装设计及制造技术研究，为后续喷嘴的精密制造研究提供工装夹具，最终获得满足技术要求的副喷口、柱塞等喷嘴关键零件，为开展喷嘴的尺寸检测、性能测试技术研究提供合格的喷嘴零件。

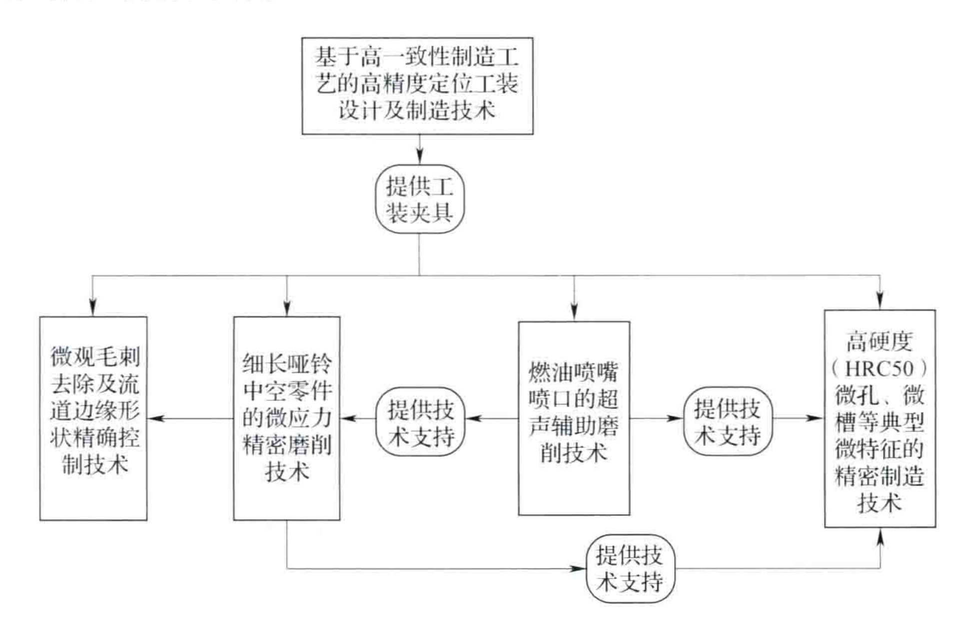


图 7－12　喷嘴典型特征的高一致性精密制造工艺及优化技术路线

（1）高硬度微孔、微槽等典型微特征的精密制造技术

根据微孔、微槽等典型微特征尺寸小、精度高、硬度高的特点，采用镗削内锥孔及微小孔或者铰削微小孔（电加工＋研磨、钻镗＋研磨）的方法，解决高硬度、高精度渐变微小锥孔的整体化一次成形加工难题：

①高精度渐变内锥孔的淬硬加工工艺；

②钻铰复合刀具设计及加工工艺技术；

③电火花加工、手工研磨的复合加工工具设计及方法；

④内锥孔及微小孔的精密微细加工技术。

（2）微观毛刺去除及流道边缘形状精确控制技术

喷嘴关键零件副喷口或旋流芯在车削或铣削加工后，易在旋流槽的流道边缘处、出入口部位产生大量毛刺，去除难度非常大：手工去除力度过小，导致去除不彻底，无法正常装配；手工力度过大，会由于去除过量而导致流道边缘塌边、受损等，更无法满足去除毛刺并保持锐边的特殊要求。

在典型喷嘴加工工艺及切削参数优化的基础上，针对旋流槽、出油槽等高轮廓度及需

要保持锐边的结构，采用微应力装夹定位、缓进给低应力高速磨削等技术手段，解决旋流槽的流道边缘形状精确控制、微观毛刺去除等技术难题：

①微观毛刺去除工艺流程设计及优化技术；

②微小结构的微应力装夹定位方法；

③特殊结构砂轮的优化设计及制造技术；

④旋流槽的缓进给低应力高速磨削技术研究。

（3）细长哑铃中空零件的微应力精密磨削技术

喷嘴关键零件之一的柱塞是细长哑铃形中空零件，其结构特殊、尺寸精度高、形位公差严：尺寸精度 0.003mm、圆柱度 0.0012mm、同轴度 ϕ0.008mm，壁厚只有 1mm。柱塞零件的细长哑铃中空形结构造成零件的整体刚性差，对顶磨削时易变形。

采用微应力装夹定位、缓进给低应力高速精密磨削等技术手段，合理安排轴向尺寸磨削次序，采用降低顶紧力及磨削力减小零件变形，及时修整砂轮以保证砂轮的锋利程度，降低磨削温度、磨削力，提高超窄扇形断续面磨削的尺寸精度及表面质量。

（4）基于高一致性制造工艺的高精度定位工装设计及制造技术

发动机喷嘴尺寸精度高、外形微小、结构复杂、装夹难度大，零件加工时需要在车、钻、铣、电火花及检测等不同设备之间重复装夹定位，工艺基准频繁转换重复定位精度非常低，导致零件反复拆卸加工及检测时关键尺寸超差。喷嘴零件狭小空间内分布众多的锥/球面、旋流槽、柱面槽、窄/斜槽、导流板、四方面等结构特征，无法使用常规精密台钳、V 形块、三爪卡盘等通用工装夹具。而喷嘴的关键零件在车、钻、铣、磨等通用设备之间频繁转序加工，将导致加工工序过长、工艺基准频繁转换、加工效率低、生产周期长等问题。为此提出微小零件的高精度免校准装夹技术，工装原理如图 7 – 13 所示，可有效提高喷嘴零件在不同设备上的重复装夹定位精度，缩短装夹、加工及检测时间，化解喷嘴零件的装夹难题。

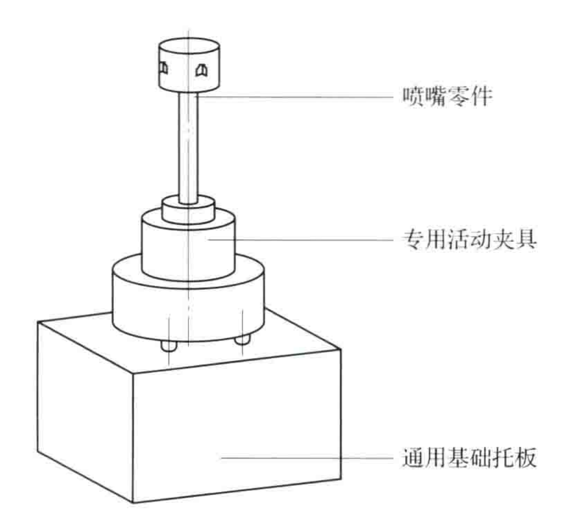


图 7 – 13　喷嘴零件的装夹结构示意图

通用基础托板可安装在不同的加工及检测设备上，零件及专用活动夹具的组合体可以安装到所有设备的通用基础托板上，通用基础托板与专用活动夹具的高精度重复定位装夹保证无需拆卸、无需重复，找正零件即可完成零件的加工、精密检测及返修复测，实现喷

嘴零件车/铣/电火花/检测等加工与装配过程中的快速装夹、定位、找正。

（5）航空发动机燃油喷嘴喷口的超声辅助磨削技术

内孔的高速/超高速磨削工艺不仅能获得与普通磨削相近的表面粗糙度，而且其材料去除率显著提高。但在磨削航空发动机燃油喷嘴喷口等小孔时困难较多，主要有：砂轮直径很小，设计和制造困难较大；砂轮轴细，刚性差，磨削时产生的挠度较大，磨削修正能力差；砂轮轴共振频率较低，限制了其转速的提高；砂轮直径接近于孔径，磨削液很难进入磨削区；孔径小，尺寸控制困难。

针对上述难题，可考虑采用超声辅助磨削技术，集超硬磨料、超声振动和精密磨削工艺三者的优势于一体，根据喷嘴材料特性和结构特征，优选工具、优化工艺，合理匹配工件—工具—工艺，实现喷嘴喷口的精密磨削加工。

7.2.3.4　燃油喷嘴组件精密检测技术

针对发动机燃油喷嘴组件微槽、微孔和微锥等典型微小复杂结构的高效精密检测需求，采用离线检测和在线测量相结合的技术途径对喷嘴组件的关键尺寸进行测量。如图 7－14 所示，其中离线检测通过基于光学检测技术的非接触测量系统与基于 CCD 和机械式接触测头的微孔测量系统完成对喷嘴组件各重要尺寸的测量，最终判断尺寸是否合格；在线测量是通过喷嘴关键微小特征在线测量系统，于喷嘴加工过程中，利用在线测量装置对喷嘴加工结构进行快速测量，通过和理论模型的对比得到正确的加工余量，从而实现对喷嘴的柔性加工，达到提高喷嘴加工精度和效率的目的。

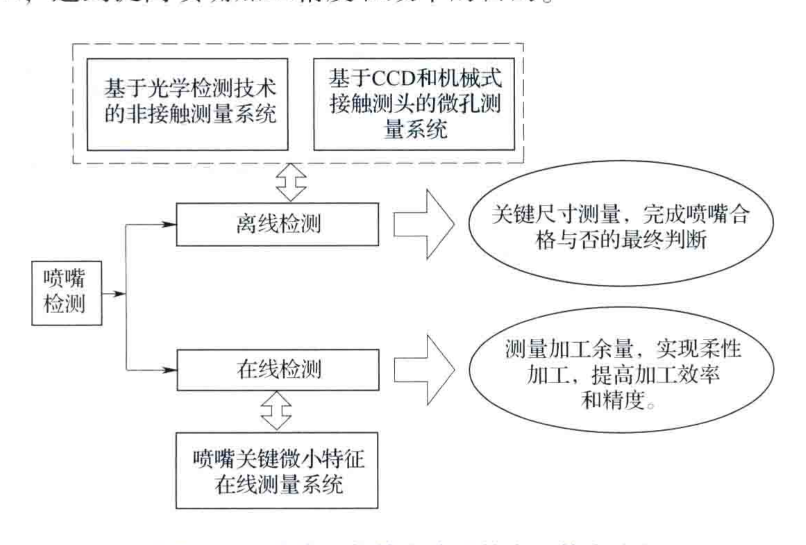


图 7－14　喷嘴组件精密检测技术的技术途径

国内对喷嘴微槽的槽宽、槽深以及槽轮廓度等尺寸都无法检测，严重影响了喷嘴流量和雾化特性。喷嘴组件中微孔和微锥类特征大多只能通过特定尺寸的量规或者标准件进行定性测量，不能定量得到微孔的准确尺寸，降低了喷嘴尺寸结构的一致性。

可采用基于光学激光传感器的多轴精密坐标测量系统对喷嘴组件的微槽特征进行快速扫描检测，见图 7－15。该系统利用基于锥光偏振全息技术的激光测头，其具有分辨率高、精度高、可进行大角度测量等特点，和普通三角法激光测头比，具有同轴度高的优点，并且采集速度快，可达到 3000 点/min。搭建三轴精密快速坐标移动平台，结合高精度回转台，构建微小零件特征非接触多轴测量系统。通过非接触方式实现复杂轮廓的快速

精确测量，获得准确的几何尺寸和位置信息，实现微小零件特征信息的精密、高一致性的快速检测和评价。

喷嘴组件被测面是空间连续的几何型面，对于已知型面方程且定位基准明确的检测曲面，将直接以理论轨迹为检测路线的轨迹；而对于未知形状曲面，测量系统采用示教式方法进行测量从而提高检测精度。在精确快速的检测过程中，测头将根据待测曲面的法线通过高精度转台做自适应的转动，使测头自动沿着被测面的法线方向进行扫描，提高检测精度。

机械式接触测头采用高分辨率电感式敏感原理，如图 7－16 所示。通过自适应入孔机构，搭载柔性铰接接头进行微孔孔径检测。微孔测量时，机械台体带动测头竖直向下运动，插入孔中。在此过程中读取测头数据，当孔径数据稳定不变时说明已经完全进入孔中，记录出现第一个稳定数据时的坐标 P_1，继续向下运动，当孔径读数偏离稳定数据时，认为测头已经穿过孔，记录坐标 P_2，P_1-P_2 即孔的长度。利用机械式接触测头对微锥测量过程与此类似。



图 7－15　基于锥光偏振全息技术光学测头的多轴测量系统

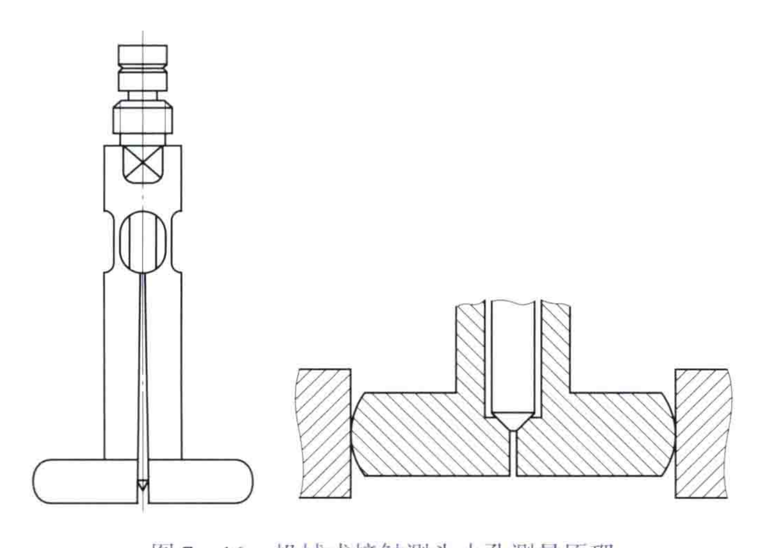


图 7－16　机械式接触测头小孔测量原理

对于0.5～1mm的微孔来说，也使用CCD视觉传感器实现非接触式测量，如图7－17所示。通过远心镜头消除景深误差，并在CCD实现成像，应用专业图像处理软件对喷嘴微孔图像进行处理，从而得到喷嘴微孔直径。

7.3　薄壁类零件精密加工技术

7.3.1　概述

薄壁结构零件由于重量轻、强度高等结构特点，已被广泛应用于航空、航天领域。特别在航空工业中，薄壁结构零件一直都是其结构中不可缺少的重要组成部分。随着现代飞机的性能要求不断提高，整体薄壁结构零件的应用更加显著和突出，已成为现代飞机广泛采用的主要承力构件。当前整体薄壁结构零件的制造技术水平，已经成为衡量世界各国航空技术水平和基础工业的重要标志之一。

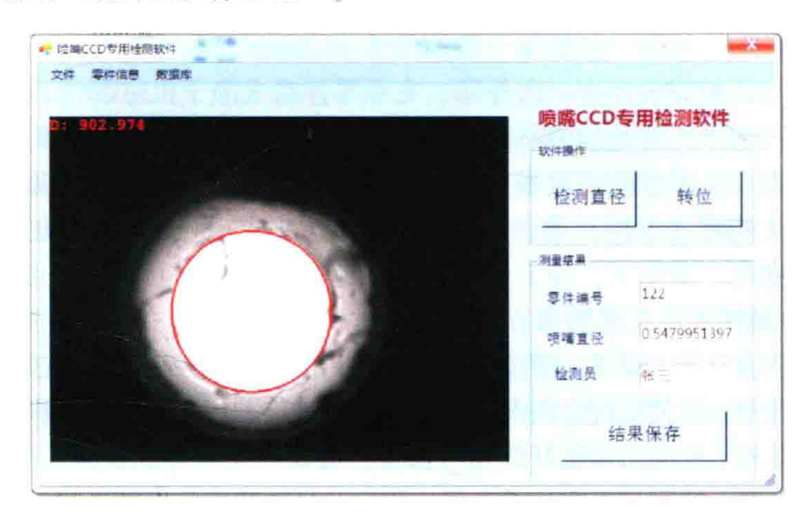


图7－17　CCD光学成像测量微孔

7.3.1.1　航空领域中的薄壁件

在航空工业中广泛应用薄壁结构零件，要求结构重量要轻。飞机薄壁结构零件主要分为飞机机身结构中的薄壁结构零件、装配机载设备的框架壳体类薄壁结构零件，以及飞机发动机结构中的薄壁结构零件等。

在飞机机身结构中，薄壁结构零件主要有整体壁板、框体类零件、梁类零件、缘条和长桁类零件、坐舱盖骨架等。由于CAD/CAM技术在飞机制造中的应用，现代飞机有条件将蒙皮、筋条、凸台等部分结构组成整体构件，即整体壁板。整体壁板是广泛应用于现代飞机的承力构件。框体类零件是飞机机身横向结构的主要承力件，同时又是形成和保持机身径向外形的主要结构件。早期的机身框体结构一般是由多个框类零件组成的组合框；但随着军用、民用飞机性能的不断提高，整体结构大件的应用日益增加，整体框逐渐取代组合框被应用于飞机的机身结构中。梁是飞机的重要受力构件，其结构复杂，加工变形问题突出。缘条和长桁类零件是飞机机身主要的纵向承力构件，其形状愈趋复杂，广泛应用于机身及机翼部分。坐舱盖骨架一般分为整体式和分解式两大类，由于现代飞机的性能要求越来越高，整体式逐渐取代分解式而成为小型高速飞机坐舱盖骨架的主要结构形式。

作为航空机载设备的结构主体，框架壳体类薄壁结构零件是机载零件中的基础件。众多零件、组合件、部装件和成件通过框架或壳体组合在一起，才构成了具有规定功能的独立产品。因此，装配机载设备的框架壳体类薄壁结构零件又被称为“装配产品的母体”，母体的精度将直接影响各部件及最终产品的性能。如液压油泵壳体、燃油调节器壳体、液压助力器壳体、电液舵机壳体、恒速装置壳体、导弹发射架壳体、雷达装置框架、航空仪表框架、活动炮塔壳体和框架等都是不同产品的“装配母体”。壳体类零件在飞机的机械产品零件总数一般不足5%，但因其形体复杂，加工难度大，加工周期长，加工工作量占整个产品工作量的比例较大，故在很大程度上决定了产品的生产周期和成本。

航空发动机结构中的薄壁结构零件种类较多，构形复杂。典型的薄壁零件有盘类零件、叶片、机匣结构零件、空心细长轴类零件、鼓筒类轴、环形件等。发动机的盘类件是指压气机盘、风扇盘及涡轮盘类件与其相应的轴、叶片相连接而组成的转子组件。盘类件构形复杂，并因功能而异，一般尺寸较大。如组成盘类件结构的鼓筒壁厚2~3mm，辐板最薄处的厚度为0.9~1.2mm，而最薄的叶片壁厚可达0.2mm。机匣结构零件主要包括发动机环形机匣以及箱体机匣，其壁厚一般为1.5~2.5mm。环形机匣是由进气机匣、风扇机匣等静止机匣与其相应的叶片、内外环、支承零件组成静子机匣部件，机匣部件则是发动机的承力部件；箱体机匣是指中心传动机匣、附件传动机匣、减速器机匣等。而航空发动机的环形件占发动机零件的比重很大，类型多、分布很广，如涡轮导向器外环、燃烧室机匣安装边、叶片挡圈（卡环）等。航空发动机结构中的薄壁结构件的突出特点就是壁薄、刚性差、精度高、难加工，加工工艺有其自身的特性。

7.3.1.2 薄壁件精密加工工艺特点

薄壁件具有结构复杂、壁薄、刚度低等特点，目前采用数控铣削的方法来进行加工。在数控铣削加工过程中，工艺系统会在夹紧力、切削力、传动力、切削热等综合作用下产生变形，从而破坏刀具和工件间已调整好的相对位置，造成尺寸误差或表面几何形状位置误差，影响工件的加工精度。特别是当零件的形状、位置及尺寸精度要求较高时，对装夹方式、切削力、切削温度和走刀路径等均十分敏感，往往在未加工到规定尺寸时，零件已经变形，或者加工精度达不到要求。薄壁件在飞机设计上的广泛应用以及以上提到的薄壁件加工精度问题，对航空制造技术和工艺装备提出了新的要求，对传统的切削工艺提出了挑战。

航空薄壁件的加工变形主要有两个来源：工件在切削加工中的装夹条件；刀具对工件的切削作用。装夹条件是指工件的定位和夹紧，装夹在整个加工或装配过程中确保工件准确定位、保持工件的稳定，把工件的变形和位移控制在一定的范围内。工件在机床上的装夹精度是影响加工精度的重要因素。优化装夹方案对于提高薄壁件的加工精度有重要意义。刀具的切削作用是指铣削过程中，由于切削力、切削热等作用，工件将产生弹性变形，走刀过后变形弹性恢复，致使部分材料残留而未被切除，造成了零件表面的加工误差。针对低刚度零件而言，切削力是影响结构件加工变形的主要因素之一。除了在设计阶段要对工件的尺寸、形状进行综合考虑，更重要的是对加工过程进行定量的研究分析，合理地进行工艺设计，包括正确选择装夹方案、加工工艺参数以及优化刀具路径等，以满足加工精度的要求。目前，为了达到设计所要求的加工精度，主要采用的方法是保守切削，增加打磨工序，这样就大大降低了生产效率，而且质量难以保证。加工变形和加工效率问题已成为影响薄壁件加工的重要约束，这样会使零件结构设计受到制造水平的制约，直接

影响航空产品的更新换代。对于形状及尺寸精度要求较高的薄壁件，工装、切削力和走刀路径等是影响加工变形的敏感因素。为了有效地减小和控制薄壁件的加工变形，可以对工件的装夹方案和切削参数进行优化，在必要的时候还可以对加工路径进行主动补偿优化。

7.3.1.3　薄壁件精密加工现状

以计算机为工具，有限元模型为载体模拟薄壁件的加工过程，对薄壁件进行装夹优化和切削参数优化，并在变形预测的基础上对加工变形进行补偿，可以减小薄壁件的加工变形，提高工件的加工质量，是目前弱刚度薄壁件加工变形控制的可行方法。在广大学者努力下，在装夹优化、切削参数优化、路径补偿方面已经取得了不少成果，如在装夹优化方面，基于有限元方法预测夹具系统中工件的变形的理论已基本成熟，夹具布局、夹紧力、装夹顺序以及加载方式等对装夹变形的影响都有了一定的研究；在切削参数优化方面，基于有限元模型预测加工变形，并在此基础上优化切削参数的研究方法已经得到普遍的应用；在变形补偿方面，针对具体的研究对象，提出了刀具轴线偏摆和偏移铣削路径等方法。但是在具体的工作中仍然存在以下一些问题：

①在加工变形预测中，现有预测模型主要侧重于单层切削的静态仿真，没有考虑切削力与加工变形的耦合效应以及分层切削中相邻切削层之间的相互影响。

②在加工变形补偿研究中，主要集中在腹板加工和侧壁加工，并根据预测的变形值直接进行路径补偿或刀具偏摆，没有对补偿量和补偿路径进行优化。

③对薄壁件加工过程的优化研究主要集中在简单的板类或框类零件，计算工作相对简单易行，与实际生产中的复杂薄壁件有一定的差距。

④加工变形控制停留在经验、试验分析阶段，没有建立较系统的理论及预测和补偿平台。许多工艺研究还不成熟，无法应用于工程实践，也无法投入到新一代产品的研制。

⑤现有产品的制造，基本是靠经验及效率低的切削及热处理过程完成，效率不高且质量稳定性不好。

7.3.2　机载设备典型薄壁件的精密加工工艺方案

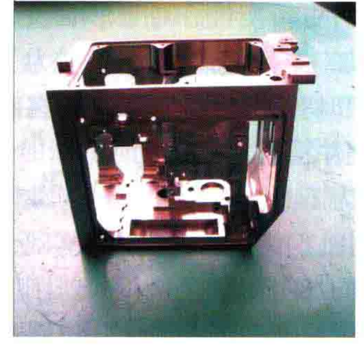
当前随着各国相继推进新一代战机的研制，都已将综合光电系统放在关键位置，尤其是针对人、飞机、导弹、信息一体化的设计思路，要求尽可能缩短飞行员的反应时间，以占领先机，按照此设计思路，在新一代战机设计中，机载设备中的先进头盔及座舱平面显示系统等机载设备的设计与制造对于飞机总体性能有着重要意义。

在未来空中战场的近距格斗中，具有大视界高精度定位的先进性能头盔是短距导弹占领先机的关键因素，因而在新一代战斗机中，如 S－37、F－22 等均选用具有良好人机结合及更轻便的飞行头盔，其精度及性能均大幅提高。头盔是集光电于一体的高技术产品，精度高、重量轻，因此应用更高精度更薄结构件（如扫描器壳体），是头盔技术发展的必然选择，提高结构件的设计精度并尽可能减少其重量摆在了其研制任务面前。

新一代战机采用广角平视显示器、两至三个阴极射线或液晶下视显示器以及背投式液晶显示器来取代大部分圆式仪表，建立良好的人机界面，从而为飞行员提供更多的信息和更方便的作战适时决策基础。这种革命性的座舱设计，使高精度薄壁复杂光电组合安装结构件更突显出其重要作用，尤其是在广角平显中，其中薄壁结构件的精度直接影响综合光电系统的精度。图 7－18 及表 7－1 为航空机载典型薄壁件及精度要求。



(a) 大视场镜座



(b) 头盔瞄准器壳体

图 7-18 机载光电系统典型零件

表 7-1 机载光电系统典型零件技术指标

典型零件名称	关键精度要求
大视场镜零件	铝或钛合金、最薄壁厚 0.5～1.5mm。形位公差要求：跨距 111.5mm 的 ϕ22mm 和 ϕ72mm 两孔，圆柱度 2.5μm，同轴度 ϕ8μm，平行度 8μm
头盔瞄准器壳体	钛合金，在 75mm×40mm×30mm 的范围内，壁厚为 0.5～1.5mm，同轴度 5μm，位置度 0.01mm，平行度 5μm

薄壁件精密加工工艺总体研究方案如图 7-19 所示：从装夹优化、切削参数优化、路径补偿优化等方面开展研究，并将工程计算力学、有限元技术与现代数控制造技术相结合，揭示零件加工变形与装夹、切削参数、走刀路径之间的关系，找出最优补偿量和加工变形之间的关系，探索中小型薄壁件精密加工工艺过程优化的方法。

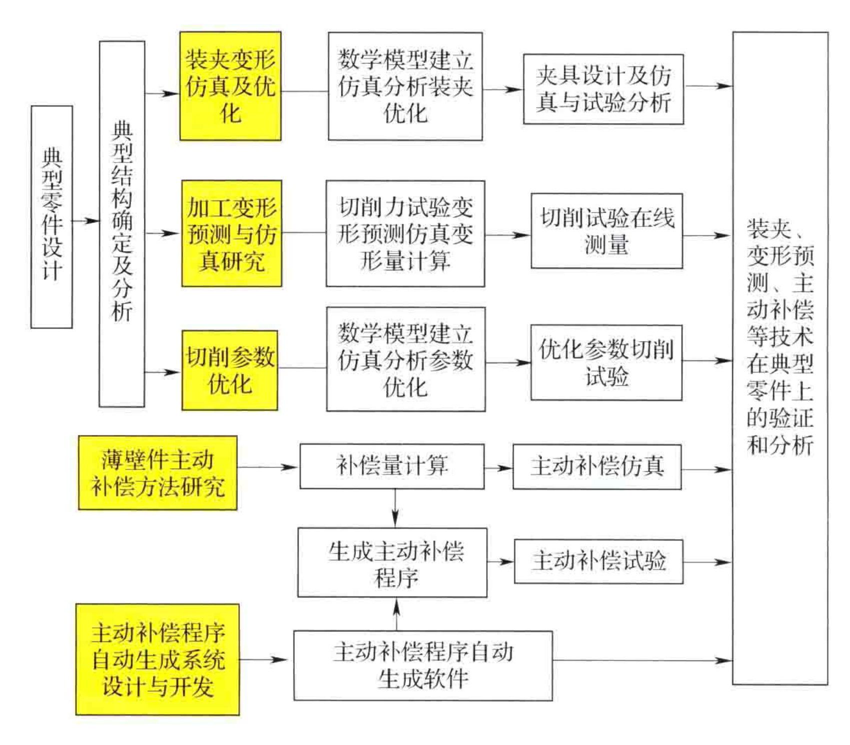


图 7-19 薄壁件加工工艺研究方案

7.3.3　薄壁零件装夹变形仿真与装夹优化技术

7.3.3.1　薄壁零件装夹方案优选的数学模型

在加工过程中，夹具的作用是正确地确定工件与刀具之间的相对位置，并将工件牢固地夹紧。因此，必须满足以下约束条件：

①平衡约束：夹具的稳定性直接影响工件的尺寸和形状误差。在整个加工过程中，保持薄壁件稳定的充分必要条件是合力与合力矩均为零，也就是要求力平衡和力矩平衡。

②接触约束：平衡约束只能保证工件 - 夹具系统在一点是平衡的，不能保证工件与支撑不发生脱离。一旦工件与支承件发生脱离，该支承件的支反力就变为零。因此，所有的支反力必须都大于零，从而确保整个加工过程中工件始终与定位件保持接触。

③滑移约束：为了将工件准确定位，支承件与工件之间不能发生滑移。

④夹紧约束：为了使工件固定，夹紧力的方向必须指向工件。

薄壁件装夹时在一定程度上会引起工件的装夹变形，从而影响工件的加工精度。控制工件的装夹变形对提高工件的加工精度有重要作用。对于不同的工件，零件精度要求也不同，包含形状和位置公差要求的特征是检验加工质量的关键。所以我们把关键面的形状和位置精度作为评价装夹方案的标准。形状和位置精度越高，形位误差就越小，因此可以通过计算关键面的形位误差来比较装夹方案的优劣，即以工件的形状和位置误差为目标函数。

7.3.3.2　装夹方案优选的流程

薄壁件装夹方案优化分成两个阶段：

①分析薄壁件几何模型，设计出符合定位和夹紧原理的装夹方案（包括定位位置、夹紧位置和夹紧力的确定）。

②基于已知装夹方案，根据定位位置、夹紧位置和夹紧力的大小计算出薄壁件的装夹变形，并验证该方案是否满足所有的约束条件，然后根据上面提出的优化模型计算目标函数值，从几种备选装夹方案中选出最优方案。装夹方案优选的流程如图 7 - 20 所示。

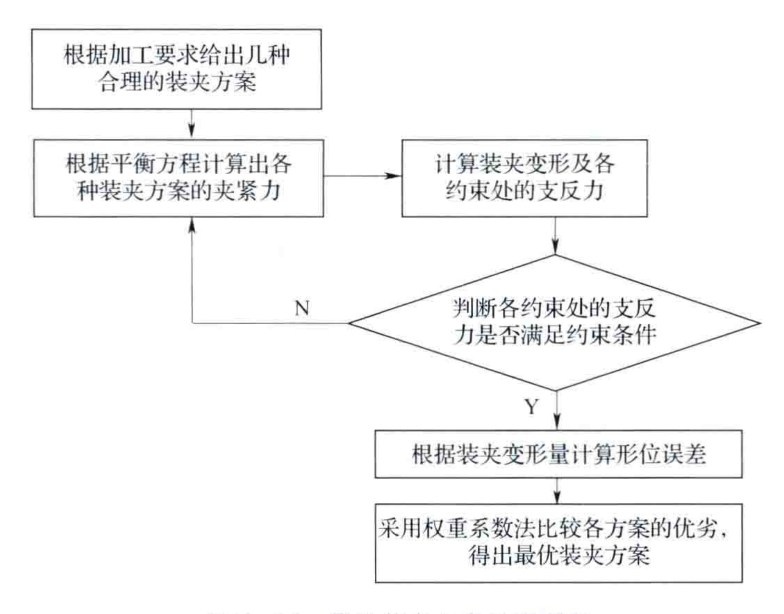


图 7 - 20　优选装夹方案的流程图

首先，分析薄壁件几何模型，根据给定的加工要求，设计出多种合理的装夹方案，包括合理的定位方式和夹紧方式。

其次，确定各装夹方案的定位位置和夹紧位置，并计算出夹紧力。夹紧力是夹具的重要组成部分，用于防止工件在切削力、自重及惯性力等作用下产生移动、翻转或振动，即保持工件定位后的正确位置。夹紧力的大小是否合适，对能否保证加工的正常进行有很大影响。夹紧力过小，将引起工件振动或移动，不能保证加工精度，严重时还将导致设备和人身事故；夹紧力过大，将引起薄壁件产生过大的装夹变形，无法保证加工质量。

第三，建立工件－夹具系统有限元模型，计算工件的装夹变形。接触模型是有限元模型中关键的要素，接触模型可以分为：刚性接触模型、弹性无接触模型、半弹性接触模型和完全弹性接触模型。刚性接触模型中，夹具元件和工件在接触区内是弹性的，其余部分是刚性体。弹性无接触模型只包含工件有限元模型，夹具元件与工件的接触由工件上被接触点的自由度限制所代替。半弹性接触模型中，工件与夹具元件相比，工件是弹性的，夹具元件在与工件接触区内是弹性的，而其余部分是刚性的。完全弹性接触模型与半弹性接触模型相比，区别就在于夹具元件不仅在接触区是弹性的，其余部分也都是弹性体。根据需要选择合适的接触模型建立装夹分析的有限元模型，然后计算出各种装夹方案下的工件变形。

第四，输出定位约束和装夹约束处的支反力，代入优化模型中验证约束条件是否满足。如果条件不满足，则修正夹紧力并代入有限元模型重新计算变形和支反力，反之，则采用 Matlab 等数学工具把计算出来的变形数据转化成工件的形状位置误差。

最后，采用权重系数法计算目标函数，比较各种装夹方案的目标函数值，得出最优的装夹方案。

7.3.3.3 实例分析

下面以大视场镜座零件（见图 7－21）为例说明装夹方案优化方法。工件材料为 ZL114A，加工 ϕ25mm 和 ϕ68.5mm 两个孔以及孔底平面。这两个孔的圆柱度要求均为 0.005mm，大孔轴线相对两孔公共轴线的同轴度要求为 ϕ0.01mm，小孔的轴线对基准平面 A 的平行度要求为 ϕ0.01mm，大孔的孔底平面对基准平面 A 的垂直度要求为 0.01mm。

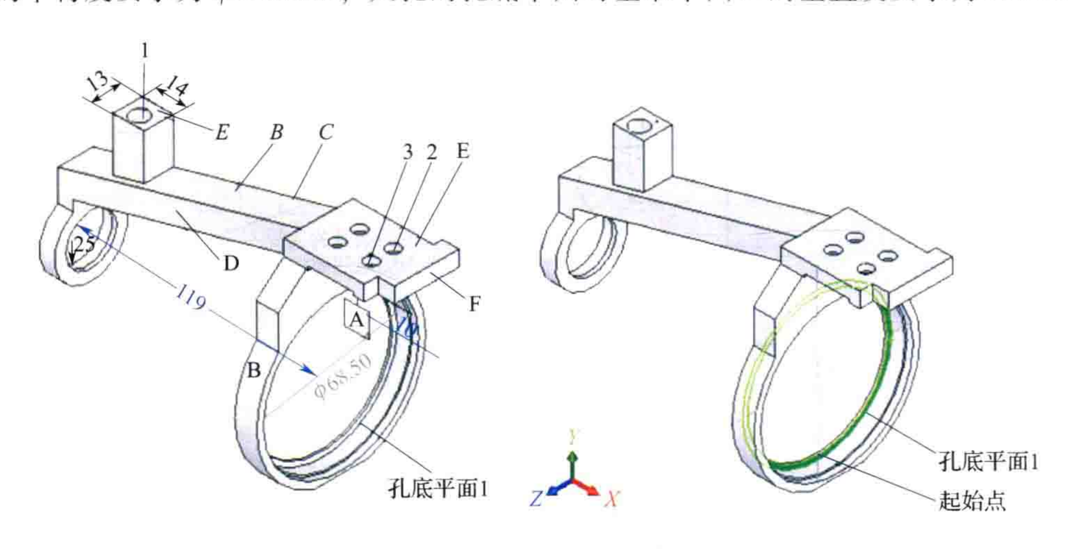


图 7－21　大视场镜座零件

拟采用的装夹方案有两种：

方案1：采用3－2－1定位原则，斜面B作为第一定位面，后侧面C上选择两个定位点，右侧面F上选择一个定位点。在正对第一定位面的平面上选择两个夹紧点，夹紧工件，确保工件在整个加工过程中保持定位后的正确位置。定位与夹紧如图7－22所示。根据平衡约束方程，计算出两个夹紧力的大小均为702.58N。

方案2：采用一面两孔定位，以凸台所在的平面E为主要定位平面，螺纹孔1和螺纹孔2为定位孔（见图7－21）。用两个螺纹孔的螺纹表面定位，这种定位方式是将工件上的螺纹部分拧到夹具上，而使工件的轴线保持在一定的位置。因为螺纹的端面所在的平面是工件的主要定位面，为了提高轴向位置精度，螺纹部分可以做成活动的，或者采用带螺纹的外涨式弹簧夹头。螺纹孔1和螺纹孔2定位的同时，还对工件进行夹紧，螺纹孔2周围的三个螺纹孔用作辅助夹紧。由于螺纹孔处螺纹的应力应变状态不是所关心的重点，有限元分析时可以简化螺栓和螺纹孔之间的连接关系，不对螺栓和螺纹精确建模，而是用圆孔代替螺纹孔，在螺栓一端建立参考点，参考点和圆孔内表面之间建立运动耦合约束，螺栓的夹紧力施加在参考点上。有限元模型如图7－23所示，通过计算得出，参考点RP－1的夹紧力为216N，参考点RP－2、RP－3的夹紧力为204N，参考点RP－4、RP－5的夹紧力为104N。

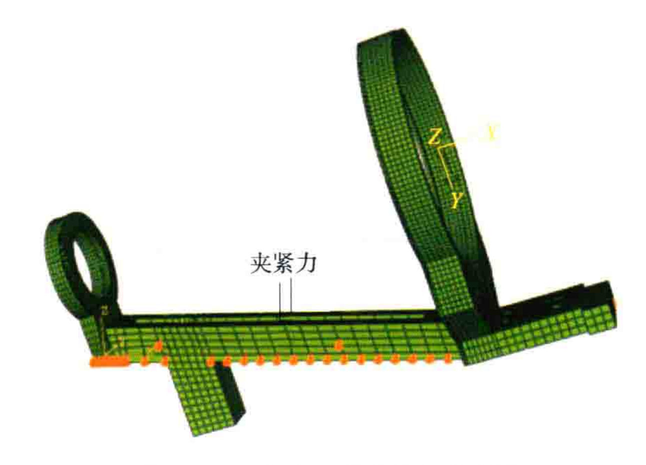


图7－22　方案1的定位与夹紧图

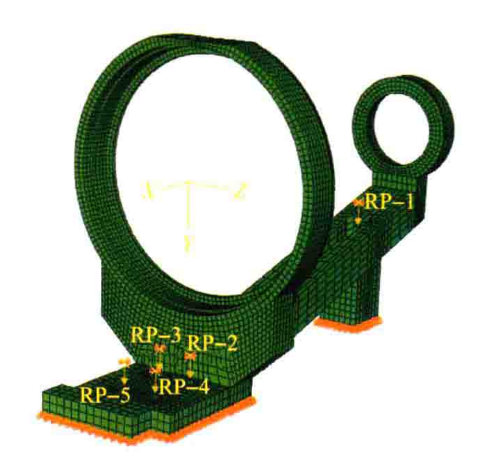


图7－23　方案2的定位与夹紧

通过计算出这两种装夹方案下镜座零件的变形和各约束处的支反力，由验证可知支反力均满足约束条件。根据变形数据，采用形状和位置误差的数学计算方法求解出装夹产生的形状和位置误差值，结果如表7－2所示。

表7－2　两种装夹方案的结果比较　　mm

项目	大孔的圆柱度	小孔的圆柱度	垂直度	同轴度	平行度
方案1	3.008×10^{-4}	1.182×10^{-4}	8.443×10^{-5}	1.677×10^{-4}	2.959×10^{-5}
方案2	1.125×10^{-4}	2.084×10^{-4}	5.637×10^{-5}	2.019×10^{-4}	1.947×10^{-5}

加工后的零件有圆柱度、平行度和垂直度等要求，在夹紧力作用下，圆柱度、同轴度、平行度和垂直度的误差越小，则认为该方案越好。设大孔圆柱度权重系数为0.25，小孔圆柱度权重系数0.15，垂直度权重系数为0.3，同轴度权重系数为0.15，平行度权重

系数为0.15，则方案1的目标函数值为1.479×10^{-4}mm，方案2的目标函数值为1.095×10^{-4}mm，所以方案2是最优的装夹方案。

7.3.4 薄壁零件加工变形预测与仿真技术

7.3.4.1 条件假设

（1）有限元模型的几点假设

针对中小型薄壁件端铣加工，采用顺铣方式。切削厚度很小，加工引起的工件的塑性变形可忽略不计，工件的加工变形视为纯弹性变形。建立了如下假设条件：

①整个加工过程中材料都处于弹性范围；

②工件材料是完全各向同性的；

③视刀具、工装系统为刚体且刀具始终锋利；

④工件的加工过程可以由一系列工况描述。在使用多工况描述刀具加工过程时，工况的数目是影响仿真精度和计算量的一个重要因素。工况太少不足以准确地描述加工过程，工况太多则相邻工况计算得到的加工变形几乎没有差别，且增加了计算量。工况的数目可以根据工程经验设定。

（2）切削力的加载

切削力的加载包括切削力的计算和切削力的分布。

如何建立正确的切削力模型是切削力加载中的一个关键的问题，它关系到切削力的计算是否准确。为了建立准确的力学模型，首先针对薄壁结构开展了切削力模型的研究，使用五轴加工中心进行了正交试验，得到准确的切削力计算公式，为加工变形预测仿真研究奠定了基础。

切削力是一个面力，作用在工件－刀具的接触曲面上。在有限元分析中，为了能更方便地体现切削力和被切除材料之间的关系，将切削中刀具和被加工面的接触面简化为台阶面，将切削力均匀作用于台阶面中的待切削面上。根据力的等效原理，将切削力等效到该面的各个节点上，在实际模拟时，通过在节点上施加力载荷完成切削力的施加。

（3）材料的去除

铣削加工过程是一个去除工件加工余量的过程，随着加工过程的进行，被切削层金属受刀具挤压形成切屑，脱离工件。对于薄壁件而言，材料被去除而引起的工件的刚度变化是不能忽略的。目前的有限元软件大都提供了模拟材料去除的方法。采用较多的是“单元生死”技术。为了达到“单元死”的效果，有限元程序通过将有限元方程的刚度矩阵（或热传导系数以及其它相似的量）乘以一个非常小的减缩因数，使其失效以“杀死”单元，而并不是真的将单元从模型中去除。单元的“杀死”在有限元模拟时，表现为与失效单元相关的单元载荷为零。被“杀死”单元的能量、质量并不包含在整个模型以内。单元一旦被“杀死”，其应变即为零。与之相反，当单元“生”时，并不是实际增加单元到模型中，它们只是被重新激活。因此，在实际分析前，必须预先定义将要被切除的部分，以便仿真加工过程时使之失效达到“杀死”单元的效果。

7.3.4.2 薄壁件加工变形预测模型

为了提高加工精度，薄壁件的精加工过程一般分多次走刀完成，我们在研究变形预测时，考虑了层与层之间的变形耦合关系，即前一次走刀的加工变形对后一次走刀的名义切削深度的影响，建立了分层铣削名义切深计算模型。

假设铣削过程被分为 m 层（m 次走刀），每一层的加工过程用 n 个工位，则第 j 层上第 i 个工位的实际名义铣削深度 $a_{p_i}^{(j)}$ 可以表示为

$$a_{p_i}^{(j)} = a_p^{(j)} + \delta_i^{(j-1)} \qquad i = 1,2,\ldots,n; j = 1,2,\ldots,m \tag{7-1}$$

其中，$a_{p_i}^{(j)}$ 为第 j 层上第 i 个工位处的实际名义铣削深度，$a_p^{(j)}$ 为加工前设定的第 j 层的初始名义铣削深度，$\delta_i^{(j-1)}$ 为第 $j-1$ 层上第 i 个工位的加工变形，见图7-24。

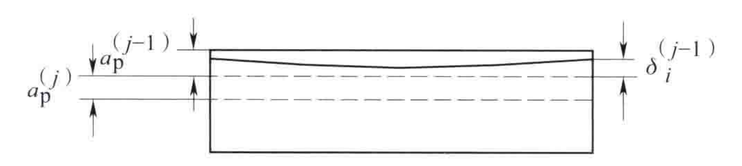


图7-24 多层铣削模型

端铣时，由于工件的变形使得轴向切深变小，导致切削力的变小，反过来，切削力减小又引起工件的变形减小，轴向切深增大，切削力增大。因此，每个工位（切削位置）的实际铣削深度采用迭代求解，迭代公式如下

$$^{v}a_{p_i}^{(j)} = a_{p_i}^{(j)} - {}^{(v-1)}\delta_i^{(j)} \tag{7-2}$$

其中，$^{v}a_{p_i}^{(j)}$ 表示第 j 层上第 i 工位在 v 次迭代后得到的铣削深度，$a_{p_i}^{(j)}$ 表示该工位的实际名义铣削深度，$^{(v-1)}\delta_i^{(j)}$ 表示第 i 工位根据 $v-1$ 次迭代后得到的切深及切削力仿真得到的加工变形。实际铣削深度的迭代求解过程也就是加工变形的迭代求解过程。迭代计算时，当前、后两次求解得到的变形值相差很小时，迭代结束。用数学公式可以表示为

$$\left| \frac{^{v}\delta_i^{(j)} - {}^{(v-1)}\delta_i^{(j)}}{^{(v-1)}\delta_i^{(j)}} \right| < \varepsilon \tag{7-3}$$

其中，$^{(v-1)}\delta_i^{(j)}$ 和 $^{v}\delta_i^{(j)}$ 分别表示第 j 层上第 i 工位在第 $v-1$ 次和第 v 次修正切深后仿真得到的变形值，ε 表示一个很小的正数，可以根据实际需要选取。此时的切削深度 $^{v}a_{p_i}^{(j)}$ 为该工位的实际铣削深度，$^{v}\delta_i^{(j)}$ 为该工位的实际加工变形量。

当前一次迭代和后一次迭代的变形量相差很小时，可以认为切削力和加工变形之间达到了动态平衡，此时的变形即为预测的加工变形，通过后处理模块可把变形值写入指定的文件进行处理。如果整个加工过程尚未结束，那么，把切削载荷移动到下一工位，通过有限元的“生死单元”技术去除切屑单元，然后循环执行直至完成整个加工过程。

综上所述，薄壁件加工变形预测的仿真流程如图7-25所示，主要包括：①创建几何模型；②定义材料模型；③划分网格；④施加边界条件和切削力载荷；⑤计算和处理加工变形量；⑥去除材料。

7.3.4.3 实例分析与试验验证

实际对大视场镜座零件试验加工表明，加工后只有孔底平面1对基准平面 A 的垂直度达不到要求，其他的面均能满足加工精度要求，所以孔底平面1的加工是加工该工件的难点所在。孔底平面1对基准平面 A 的垂直度主要受到该面法向变形的影响，所以孔底平面1的法向变形是研究的重点。

该工件的材料为ZL114A，弹性模量 E 和泊松比 v 分别为71000MPa和0.33。孔底平面1的加工余量为0.3mm，分3次走刀，平均分配加工余量，每层的初始名义切削深度为0.1mm。每层的加工过程用32个工况模拟，从起始点位置开始切入，按顺时针方向铣削，

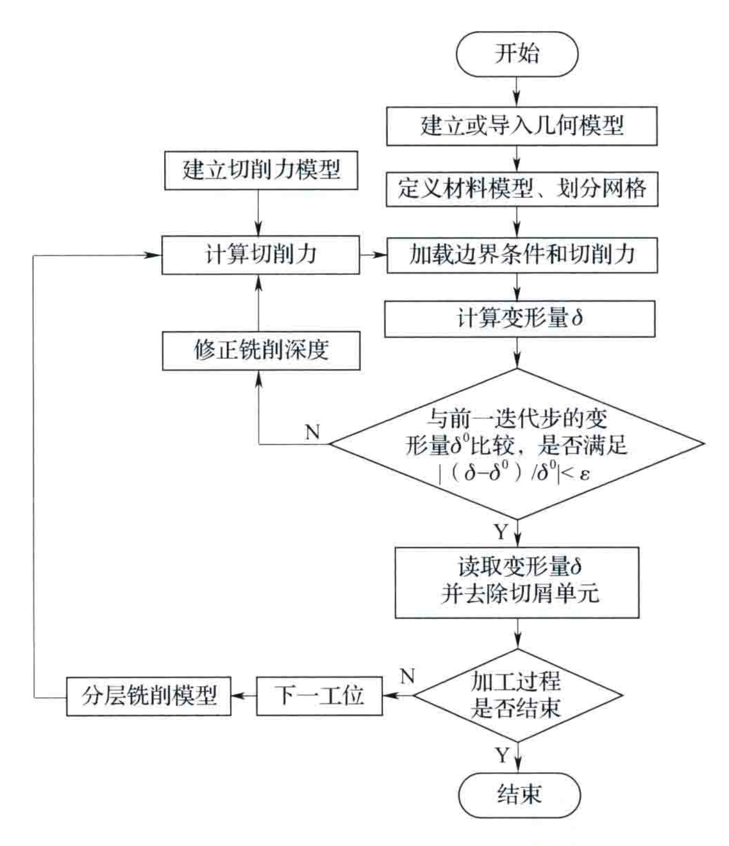


图 7－25　加工变形预测仿真流程图

采用顺铣加工。32 个工位的位置用角度来表示，工位 1 的角度为 0°，工位 2 的角度为 11.25°，即工位 1 绕圆心顺时针旋转 11.25°后所在的位置，后面依此类推。工件的装夹采用 7.3.3.2 节的优化结果。

刀具采用硬质合金刀，刀具的前角和后角分别为 10°和 15°，刀具直径为 24.1mm。刀具转速 $n=300\text{r/min}$，进给量 $f=0.05\text{mm/r}$，初始名义切深 $a_p=0.1\text{mm}$，铣削宽度 $a_e=2.25\text{mm}$。

使用相同的切削参数在五轴坐标加工中心上对大视场镜座零件进行加工，如图 7－26 所示。加工后，在已加工表面上选取 20 个均匀分布的测点，如图 7－27 所示，测量这 20 个点的变形量，并与仿真预测值相比较（见图 7－28）。



图 7－26　大视场镜座零件的加工

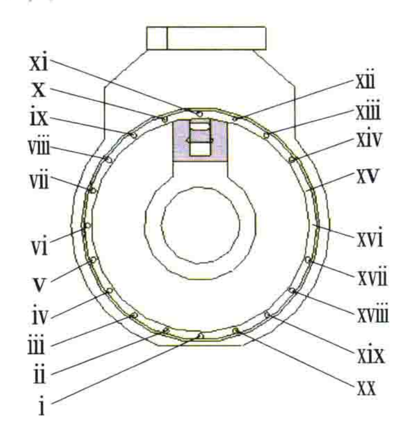


图 7－27　实际加工后测点的选取

从图 7－28 中可以看出，由于工位 1 工件的刚度最弱，所以变形最大（负号表示变形方向为坐标轴的负方向），从工位 1 到工位 16，刚度逐渐增大，变形逐渐最小。试验加工变形值与仿真预测变形值的变化趋势是一致的，但是从 60°到 300°之间，试验加工得到的变形值要略大于仿真预测值（比较绝对值的大小），这是因为加工过程中引起变形的因素有很多，除了切削力以外，还有切削热和振动等，有限元仿真时忽略了切削热和振动等因素的影响。

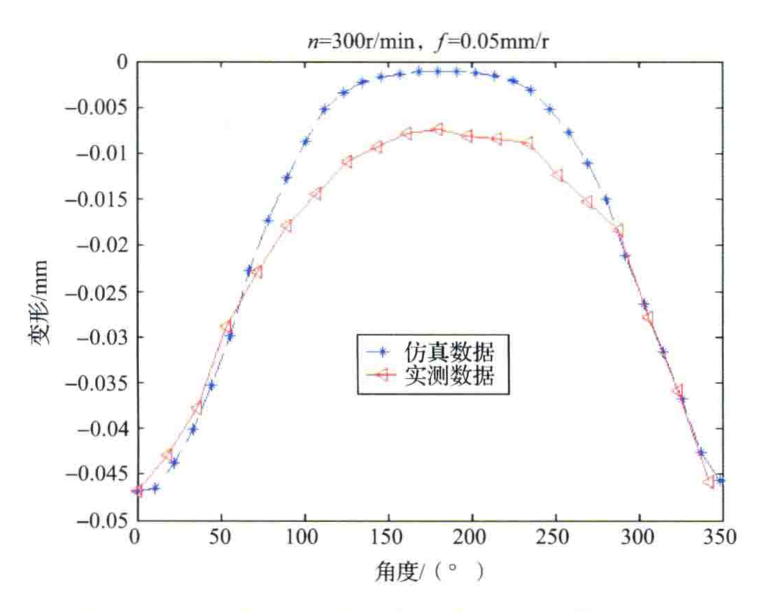


图 7－28　试验加工变形值与仿真预测变形值的比较

7.3.5　薄壁零件主动补偿技术

加工过程中，工件受到切削力作用发生变形，从而产生让刀现象，造成一部分材料残留下来，残留下来的余量等于加工过程中的变形量，加工完成后，变形弹性恢复，造成工件的尺寸误差和形状位置误差。在加工条件一定的情况下，工件的壁厚越薄变形越严重，产生的误差也越大。让刀引起的残余材料是铣刀在切削过程中无法切除的，所以必须在数控加工编程中予以主动补偿。所谓主动补偿技术，即让刀具在原有走刀轨迹上根据受力变形附加一个连续的位移量，补偿因变形产生的让刀量。

7.3.5.1　主动补偿技术

采用主动补偿可以减少让刀残余量，减小加工误差，提高薄壁件加工精度。对加工路径进行主动补偿的关键之一是补偿量的确定，即加工路径上各刀位点相对于原有路径的偏离量的确定。对于不同的路径补偿方法，补偿量和补偿效果不一样。对多次走刀下的分层完全补偿和优化补偿两种路径补偿方法进行了研究，并以薄壁镜座件单刃端铣加工为例，采用数值仿真与试验分析相结合的方法，对完全补偿、分层完全补偿和优化补偿法的补偿结果进行了分析与比较，得出了分层完全补偿和优化补偿能够更好地减少加工误差的结论，为薄壁件受力变形控制提供了一种较好的主动补偿方法。

（1）完全补偿与分层完全补偿

完全补偿是指走刀路径上各工位（为简化仿真过程，采用离散的工位代替连续的切

削过程）处的补偿量等于变形量的补偿方式。如图 7－29 所示，工件上 P 点的变形值为 Z_i，则该点的补偿值也取 Z_i，补偿曲线与变形曲线沿基准轴对称。显然，完全补偿时，由于补偿量等于变形量，对不同切削位置的变形量进行连续插值就可以得到连续的补偿量。

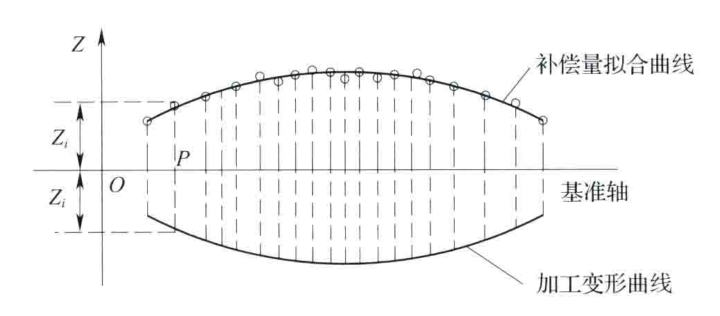


图 7－29　补偿量与变形量

分层完全补偿是指在每次走刀过程中，对刀具路径进行完全补偿，以减少只进行最后一次补偿所带来的较大的回弹误差，同时可以避开回弹系数的计算问题。

图 7－30 为其中一层采用完全补偿加工的示意图，图 7－30 中 a 线表示某一层加工前的工件表面；b 线表示某一层加工后的理想表面；c 线表示补偿前 b 线加工变形后所在的位置，也是完全补偿时的刀具走刀轨迹；d 线表示补偿前加工后的表面，c 线与 d 线关于 b 线对称；e 表示某一层完全补偿加工后的表面。某一层补偿后，再进行后一层完全补偿时，余量更加均匀，从而减少加工误差。

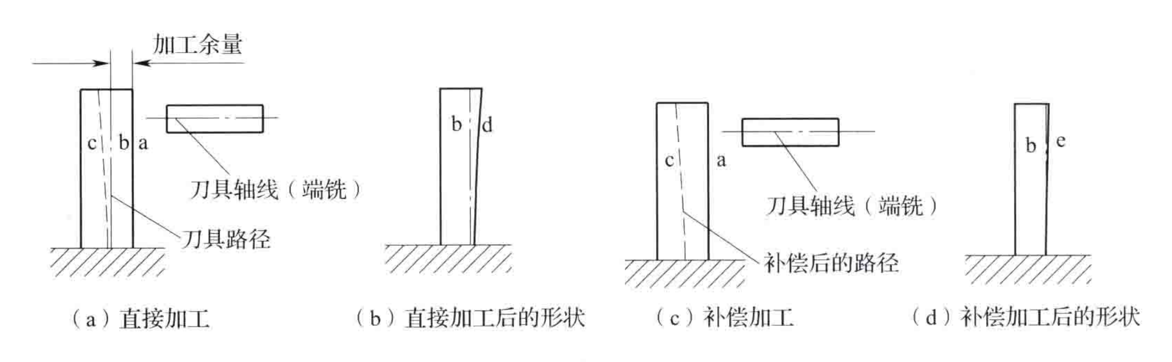


图 7－30　某一层完全补偿加工示例

（2）优化补偿

分层完全补偿适用于精加工走刀次数在两次以上的加工过程补偿，在精加工只采用一次走刀的情形下，分层完全补偿则等同于完全补偿，没有考虑补偿量与加工变形间的耦合关系，为此，针对一次走刀过程，提出了基于预测变形的路径优化补偿方法，以解决补偿量与加工变形之间的耦合关系，把工件的加工误差减小到可以忽略或满足要求的范围内。

①加工路径优化补偿模型

加工路径优化补偿主要指对路径上各工位处补偿量进行优化，然后根据一组最优补偿量，通过拟合、插值等方法确定最优补偿路径。为了达到优化补偿的目的，必须对每一个工位处的补偿量分别进行优化，把各工位处的加工误差都减小到允许的范围内，即以最小化所有工位处的加工误差为目标函数进行优化，表示为

$$\begin{aligned} &\min f(\gamma_{i,j}) = \Delta_i^{(j)} \\ &f_{\min} \leqslant f \leqslant f_{\max} \\ &v_{\min} \leqslant v \leqslant v_{\max} \end{aligned} \tag{7-4}$$

式中，$\Delta_i^{(j)}$（$i=1, 2, \cdots, n$；$j=1, 2, \cdots, m$）表示第j层第i个工位的加工误差；$\gamma_{i,j}$表示该工位的补偿量，为所求的设计变量；f、v为进给量和切削速度，有一定的范围限制。

②加工路径优化补偿量的求解

优化补偿考虑了切削深度与加工变形之间的耦合关系，最优解$\gamma_{i,j}$即为第j层第i个工位处的最优补偿量。最优补偿量求解采用迭代算法，即每一迭代步均完全补偿前一迭代步中的加工误差，然后采用有限元方法计算当前迭代步的加工误差，若误差没有达到要求，则继续迭代，反之，迭代终止。优化补偿量求解流程如图7-31所示。

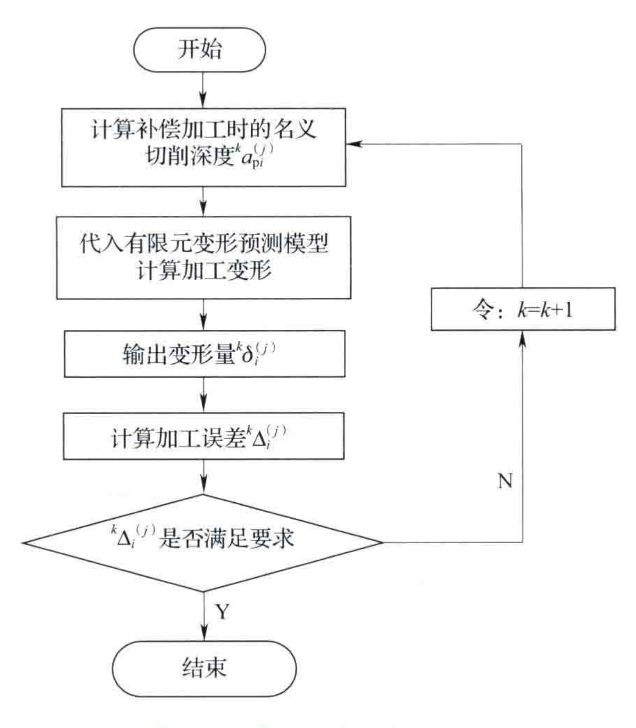


图7-31　最优补偿量求解流程图

对于第j层第i个工位而言，补偿量的初始值为0，即没有补偿量，求解出此时的加工变形量$\delta_i^{(j)}$。显然，在补偿前工件的加工误差$^0\Delta_i^{(j)}$等于加工变形量$\delta_i^{(j)}$。第一次迭代时，补偿量$^1\gamma_i^{(j)}$等于前一次的加工误差，表示为

$$^1\gamma_i^{(j)} = {^0\Delta_i^{(j)}} = \delta_i^{(j)} \tag{7-5}$$

此时的名义切深为

$$^1a_{p_i}^{(j)} = a_{p_i}^{(j)} + {^1\gamma_i^{(j)}} = a_{p_i}^{(j)} + \delta_i^{(j)} \tag{7-6}$$

切削深度的变化直接影响切削力的大小，从而引起变形量的改变。把切深代入加工变形预测模型计算出加工变形量$^1\delta_i^{(j)}$，此时的加工误差为变形量减去补偿量

$$^1\Delta_i^{(j)} = {^1\delta_i^{(j)}} - {^1\gamma_i^{(j)}} = {^1\delta_i^{(j)}} - \delta_i^{(j)} \tag{7-7}$$

第k次迭代时，补偿量等于第（$k-1$）次的补偿量加上该补偿量下的加工误差，表

示为

$$\begin{aligned}{}^{k}\gamma_i^{(j)} &= {}^{(k-1)}\gamma_i^{(j)} + {}^{(k-1)}\Delta_i^{(j)} \\ &= {}^{(k-2)}\delta_i^{(j)} + ({}^{(k-1)}\delta_i^{(j)} - {}^{(k-2)}\delta_i^{(j)}) \\ &= {}^{(k-1)}\delta_i^{(j)}\end{aligned} \tag{7-8}$$

补偿量为${}^{k}\gamma_i^{(j)}$ 时的加工变形量为${}^{k}\delta_i^{(j)}$，加工误差为

$$\begin{aligned}{}^{k}\Delta_i^{(j)} &= {}^{k}\delta_i^{(j)} - {}^{k}\gamma_i^{(j)} \\ &= {}^{k}\delta_i^{(j)} - {}^{(k-1)}\delta_i^{(j)}\end{aligned} \tag{7-9}$$

依此类推，直至把变形误差降低到一个很小的范围内，用数学公式表示为

$$|\Delta_i^{(j)*}| = |{}^{w}\Delta_i^{(j)}| = |{}^{w}\delta_i^{(j)} - {}^{(w-1)}\delta_i^{(j)}| < \eta \tag{7-10}$$

式中，w 表示迭代终止时的迭代次数，η 表示一个趋近于零的很小的正数。

根据计算得到的优化补偿值，通过曲线曲面拟合方法求得刀位轨迹上各插值点的优化补偿位置，以此补偿位置作为刀位轨迹和数控加工程序修正的依据，使刀具按照补偿轨迹加工，达到补偿目的。

7.3.5.2 实例仿真分析与试验验证

（1）完全补偿与分层完全补偿

以薄壁镜座零件孔底平面 1 的加工为例，机床：Mikron UCP－710 加工中心；装夹方式：一面两孔定位，螺旋夹紧；刀具：硬质合金刀，刀具的前角和后角分别为 10°和 15°，刀具回转直径为 24.1mm；切削参数：$a_p = 0.1\text{mm}$，$a_e = 2.25\text{mm}$，$n = 1200\text{r/min}$，$f = 0.06\text{mm/r}$。

完全补偿与分层完全补偿（分三次走刀，每次加工余量为 0.1mm）的仿真结果如图 7－32 所示。分层完全补偿后最大加工误差为 0.00036mm，比补偿前减小了 99.19%，补偿后最大与最小加工误差的差值比补偿前减小了 99.17%；只在最后一层进行完全补偿时，补偿后最大加工误差为 0.0061mm，比补偿前减小了 86.11%，补偿后最大与最小加工误差的差值比补偿前减小了 85.13%。

由此可以看出，分层完全补偿可以更加有效地减小薄壁件加工误差，并且使误差更加均匀。这是因为只对最后一层进行补偿时，各个切削点处的切削状态发生了改变，切削力大小也随之发生变化，导致刀具轨迹难以一次性补偿到位。由于前面几层加工时没有对变形进行及时补偿和匀化，所以加工变形对最后一层的名义切深影响较大，导致最后一层的变形量较大，受补偿量与加工变形的耦合关系的影响也就更大，所以加工误差较分层补偿的加工误差大。

（2）优化补偿

仍以薄壁镜座零件孔底平面 1 的加工为例，刀具和切削参数等相同。取 $\eta = 0.001$，优化补偿的结果如图 7－33 所示，为了进行比较，图中的优化补偿和完全补偿均指在最后一次走刀时的补偿。优化补偿后最大加工误差为 0.00087mm（补偿结果与 η 的取值有关，η 越小，则补偿后的加工误差越小），完全补偿后最大的加工误差为 0.0061mm。由此看出，与完全补偿相比，优化补偿能够更好地减少加工误差。优化补偿的补偿量大于完全补偿的补偿量。这是由于优化补偿考虑了补偿量和变形的耦合关系。

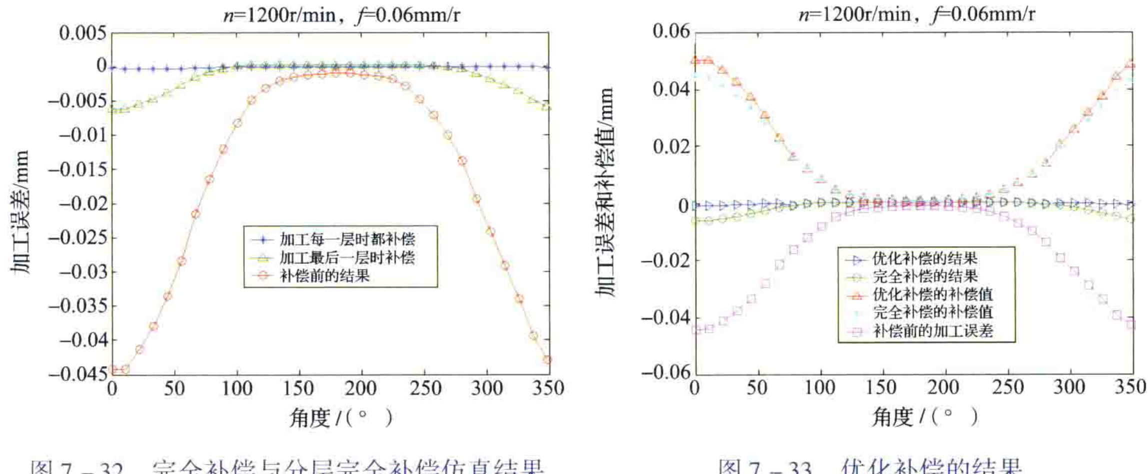


图 7－32　完全补偿与分层完全补偿仿真结果　　图 7－33　优化补偿的结果

（3）仿真与试验结果比较

采用相同参数在瑞士 Mikron UCP－710 五坐标加工中心上进行了补偿试验，结果如图 7－34 所示。可以看出，试验结果与仿真结果趋势基本一致，说明提出的补偿方法和采用的补偿仿真模型是正确的。

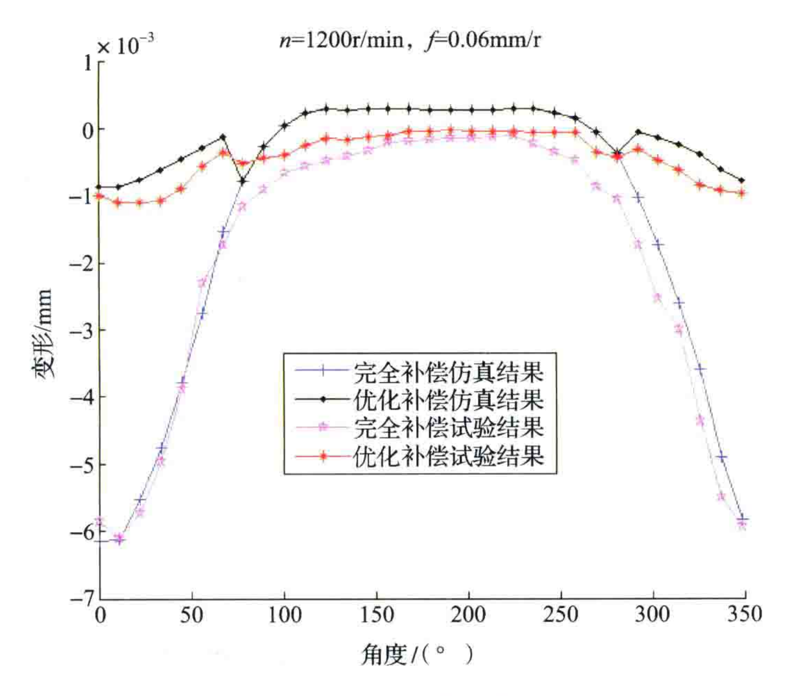


图 7－34　仿真与试验结果的比较

7.4　航空复杂壳体类零件精密加工技术

随着航空机载系统技术的快速发展及新一代飞机的发展需求，机载系统的设计越趋复杂，部件集成密度也越来越大，精度越来越高。复杂壳体类零件（如舵机壳体、燃油调节器壳体、燃油泵壳体、供氧调节器等壳体）是航空机载设备行业中典型的结构件和关键件，它们都是各自产品的基础零件，对机载系统的质量和性能有着举足轻重的作用。他

们所占产品零件数量不到5%，但加工工时却占到30%以上。其中舵机壳体是其非常有代表性零件，以舵机壳体为基础所装配出来的舵机是飞行控制系统中很重要的一个部件，通过舵机的控制，实现对飞机各种飞行姿态的控制，如机翼上的舵机可以控制飞机的滚转和俯仰，方向舵机控制飞机的偏航。新一代战斗机为能够获得更好的操纵性能并提高飞机的机动性，采用多余度及高性能设计，设计需求的改变增加了壳体的复杂性。在飞机机载设备的研制与批生产中，舵机壳体等复杂壳体类零件的高效精密制造是需要解决的共性技术难题。

7.4.1 复杂壳体类零件的特点及加工难点

作为产品的关键件，以某型号舵机壳体为例，其加工难度大、周期长，机加工工时在整个产品中占了较大的比重，是生产中的“瓶颈”零件。其特点及制造难点表现在以下几个方面：

①结构复杂：为满足多功能、高精确度、紧凑、轻载、安全等诸多要求，三种舵机壳体都是孔系众多，各加工型面和众多的型孔又分布在零件的各个不同方位上，各被加工要素和基准之间、要素和要素之间的关系错综复杂，因而图样要求保证的尺寸数据量大。以副翼舵机壳体为例，其要求保证的图样尺寸有近2000个。

②精密孔众多：舵机壳体是舵机的装配基础零件，众多的元器件内置安装，对安装孔的位置、配合精度、同轴精度及表面粗糙度要求高。如副翼舵机壳体共有300多个孔系，其中有IT6精度要求的孔200多个。

③深小孔的长径比大：为了集成设计，三种舵机壳体深小孔的设计很多，长径比较大，内部常常有多达几百个纵横交错的各种深小孔，孔的长径比最高可达到54.1，孔的直线度要求0.1mm。这给加工制造增加了难度，尤其是ϕ3mm以下深小孔的高效加工成为解决批生产急需的关键技术难题。

④清洁度要求高：众多的液压元件组装在三种舵机壳体内，因此对毛刺去除及孔系清洁度要求很高。三种舵机壳体交叉孔、台肩孔、盲孔众多，孔与孔之间的沟通方式各异，去除毛刺的部位有特殊要求，毛刺和飞边的数量多且去除难度大，目前采用手工方法去除，效率低且易出废品。

⑤检验工作量大且有难度：体现在三个方面，一是三种舵机壳体结构复杂、尺寸繁多，其中不少尺寸为重要尺寸，需要做到件件检查，尤其是占到孔系70%的堵头孔；二是为确保孔系中所有孔相交位置正确，尤其是斜孔，需要对斜孔的位置、深度、角度参数进行精确测量；三是有相当一部分型孔位置特殊，常规检验方法无法实现其测量。所以舵机壳体的检验强度、检验所用时间和检验要求都不亚于壳体加工的强度和时间。

纵观国内外舵机壳体类零件的型号需求及设计结构发展趋势，需要针对舵机壳体制造中存在的上述相关问题，在理论分析的基础上，通过加工工艺研究、软件开发、切削试验等方法，系统解决在舵机壳体制造所面临的集成数控加工、深小孔高效加工、高效检测方法、去毛刺、加工工艺参数优化等通用技术难题，有效提高舵机壳体的加工质量及效率。

7.4.2　复杂壳体类零件精密加工工艺解决方案

针对复杂壳体类零件结构复杂，交叉孔多、斜孔多、深小孔多，精度要求严格，毛刺不易去除、检验手段单一等技术特点，开展集成数控精密加工、深小孔高效精密加工、多类型孔快速精密测量、深小孔去毛刺技术等共性关键技术研究，通过专用测量装置、专用去毛刺装置的研制和各种深小孔加工方法的摸索，以及大量的工艺试验，得到适合的深小孔加工方法、加工参数和工艺条件，建立切削参数数据库，解决多类型孔的快速测量和深小孔毛刺去除问题，可提高复杂壳体类零件的加工效率和合格率。

7.4.2.1　复杂壳体集成数控精密加工技术

针对舵机壳体以型孔为主要特征的特点，通过编制数控工艺、控制关键工序、编制工艺规范、优化切削参数、建立切削参数数据库、设计制定标准化流程等数控化措施，从改进工艺提高生产效率、加强管理确保质量等方面入手，形成舵机壳体数控化加工的系统解决方案（见图 7 – 35），实现了舵机壳体的快速批量生产，解决了此类零件的集成数控加工问题。

切削参数数据库采用面向对象编程技术和关系数据库系统，并提供友好的人机交互界面，使其可以在实际生产中不断扩充和完善。数据库的主要功能为孔加工工艺查询和刀具切削参数查询，包括舵机壳体加工常用枪钻、直槽内冷钻、三刃钻、铰刀、铣刀、镗刀、丝锥、钻头、倒角刀等刀具的切削速度/转速、进给量、切削深度、预孔深度等切削参数。其中孔加工工艺查询功能中包含选择孔的不同类型、孔径、长度和精度等数据，数据库按照不同精度要求的孔由不同类型加工刀具保证的原则，推荐合适的刀具、切削参数、加工机床、加工时间及注意事项等。刀具切削参数查询模块提供多种类型不同规格刀具的切削参数查询，选择刀具类型、直径规格、刀具材料及角度等参数，数据库提供刀具的切削速度/转速、进给量、切削深度、预孔深度等切削参数。

7.4.2.2　小孔高效精密加工技术

在加工中心上加工深小孔的传统方法中，主要采用麻花钻作为加工刀具，尤其是在加工 ϕ3mm 以下长径比超过 50 的深小孔时存在刀具易折断、排屑困难、效率低等问题。而枪钻作为深小孔专用加工刀具，主要应用于配备高压内冷却系统的深孔钻专用加工设备，应用上具有很大的局限性。

针对复杂壳体深小孔数量多、孔径小、长径比大的特点，在加工中心上采用枪钻、直槽内冷钻等新型孔加工刀具与高效加工工艺技术。采用深小孔高效精密加工技术加工深小孔具有加工精度高、质量好、加工时间短等特点，加工效率较传统方法提高 30% 以上，直线度达到 0.05/100mm，精度达到 IT7 – IT9，孔的表面质量显著改善，孔的表面粗糙度 *Ra* 小于 2.0μm，有效解决了深小孔的高效精密加工问题。

（1）直槽内冷钻与单刃外排屑枪钻切削原理

直槽钻的钻尖结构见图 7 – 37，使其可在每条直槽的外缘处刃磨出 2 条刃带，钻头与工件有 4 个接触点，钻头采用大顶角及内冷结构设计，使其具有切削轻快、排屑顺畅、效率高、精度高、寿命长的特点。直槽内冷钻能够加工出圆度和直线度较高的孔，而且其切削速度比硬质合金或高速钢钻头更快，以保证枪钻能够顺利进入孔内。

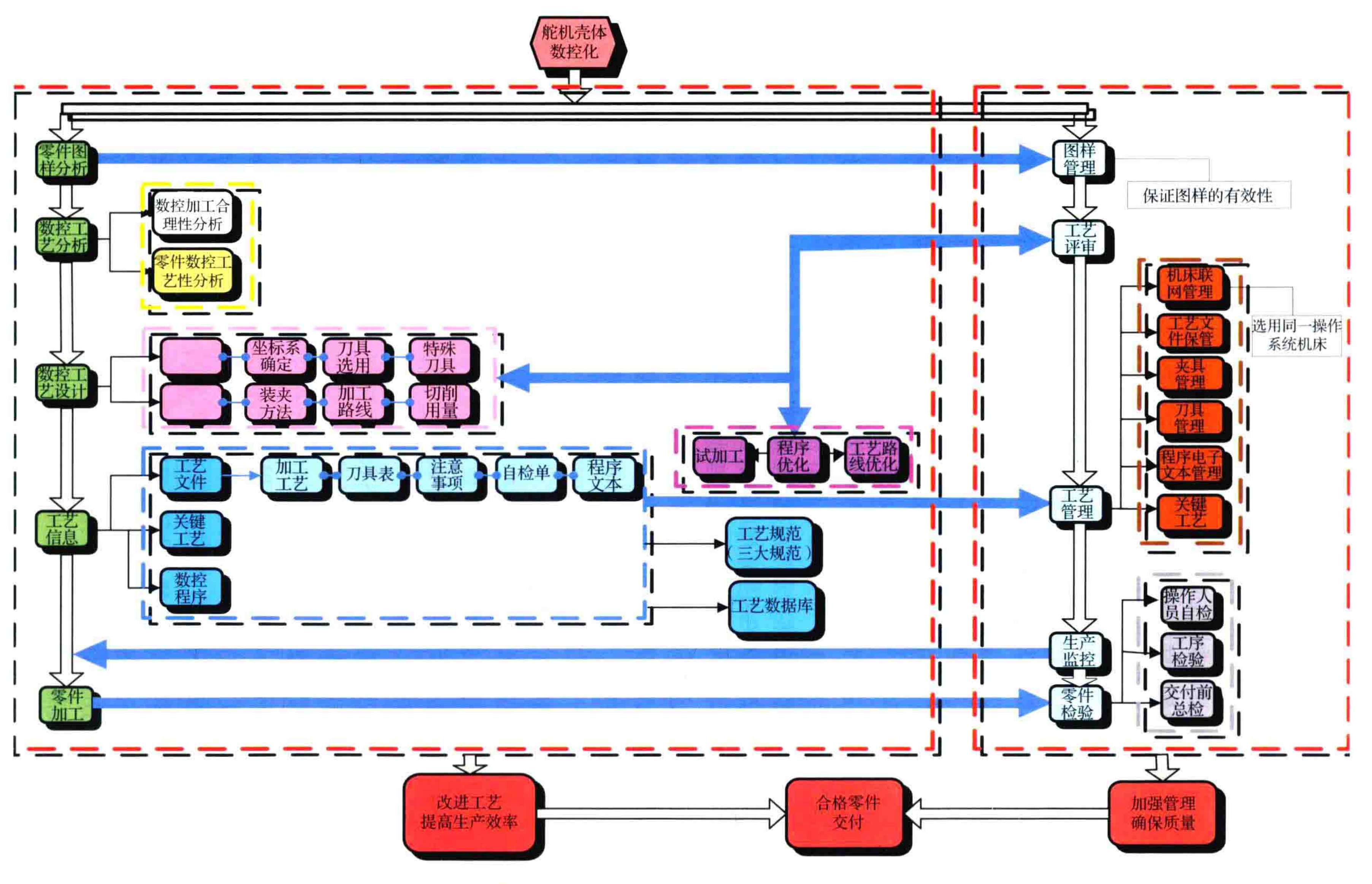


图 7－35　复杂壳体数控化加工的系统解决方案

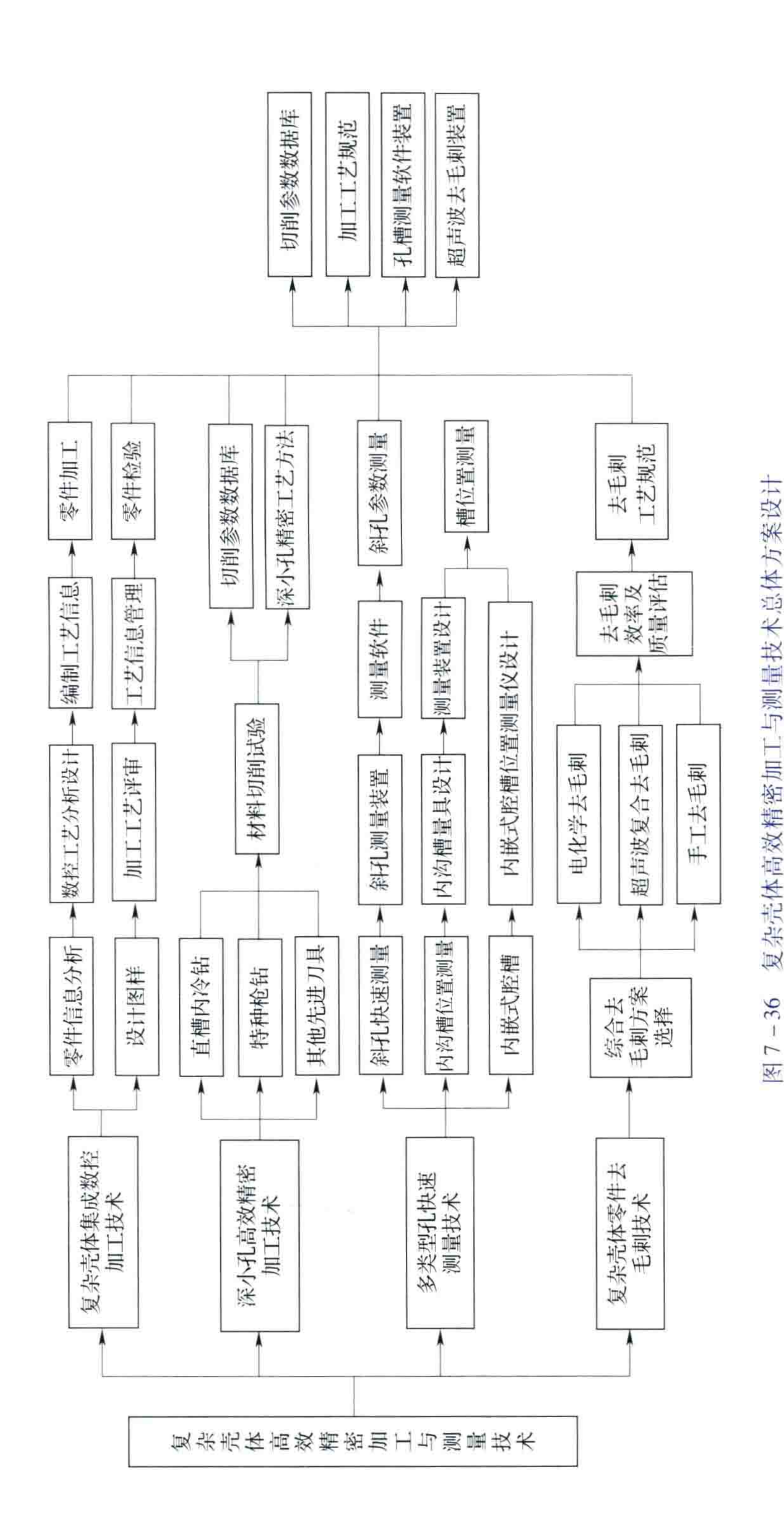


图 7-36　复杂壳体高效精密加工与测量技术总体方案设计

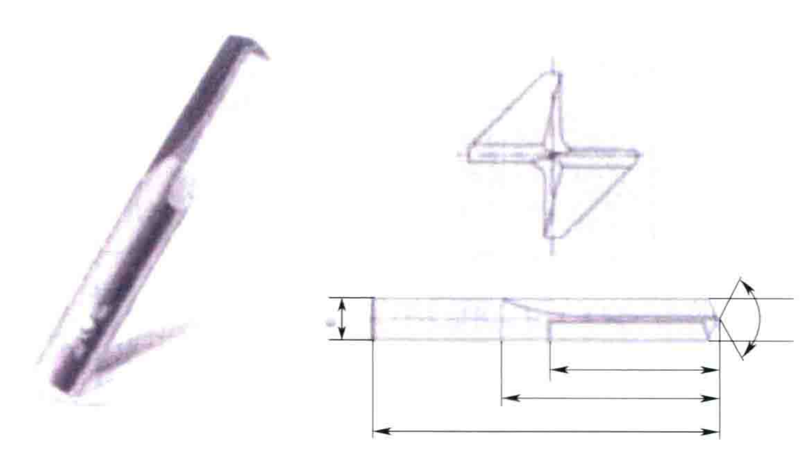


图 7－37　直槽内冷钻

单刃外排屑枪钻由刀头、钻杆与钻柄组成，刀头部分为硬质合金，如图 7－38 所示。专业的枪钻系统由深孔钻机、单刃或双刃的枪钻及高压冷却系统组成。其工作原理为枪钻柄部被夹持在机床主轴上，钻头通过导引孔或钻套进入工件，钻刃的独特结构起到自导向的作用，保证了切削精度。这时冷却液由钻杆后部中孔注入，经腰形孔到达切削区后迫使切屑随切削液由 V 形槽与工件孔壁间空间排出，故称外排屑；同时冷却液对钻刃进行冷却和对背部的支撑凸台进行润滑，从而获良好的加工表面和加工质量。因此单刃外排屑枪钻具有加工精度高、表面质量好、加工效率高、寿命长、排屑好的特点，适用于配备高压内冷却系统的深孔钻专用加工设备。

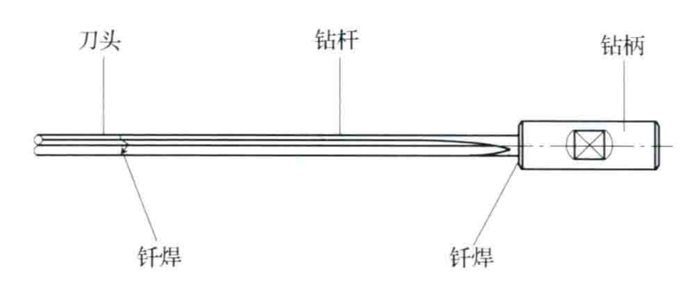
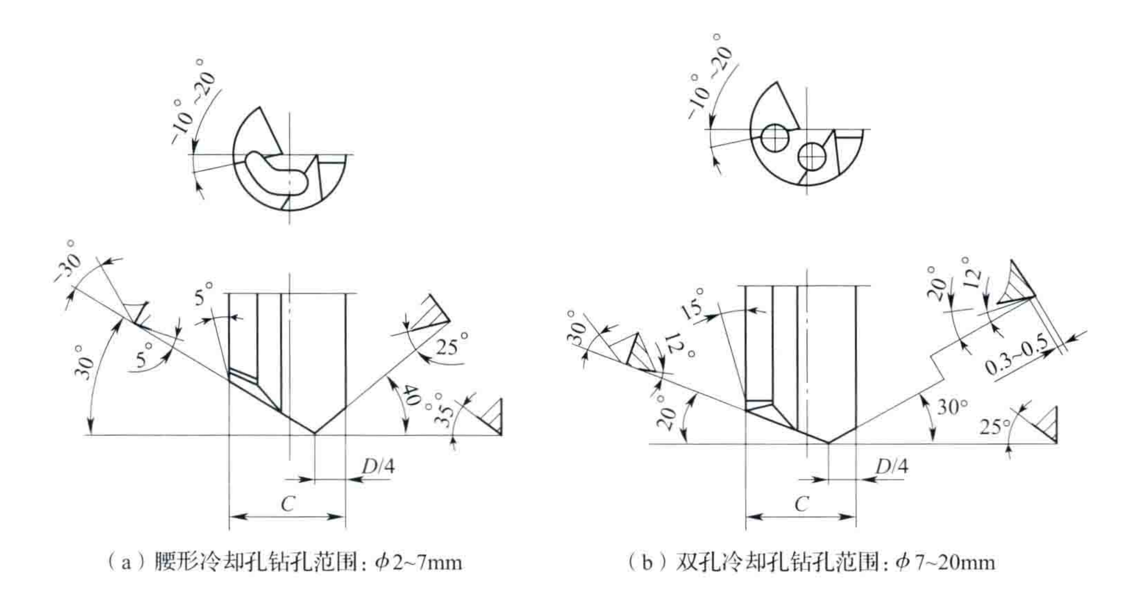


图 7－38　单刃外排屑枪钻结构图

（2）深小孔高效精密加工工艺

由于复杂壳体深小孔孔径小、长径比大，材料以高强度铝合金为主，而枪钻的钻刃结构对孔的公差、切屑形成、切削液压力及流量、刀具寿命等均有影响。为了保证在加工中心上正常使用小枪钻加工，在小枪钻设计上，采取以下措施对枪钻进行改进以满足舵机壳体深小孔加工的使用要求：

①合理设计枪钻的钻刃结构以便快速切削、断屑排屑（见图 7－39）。将枪钻的钻尖设计成偏离轴心以形成外内二刃，外刃（主切削刃）较短，内刃（副切削刃）较长，外刃形成的主偏角大于内刃形成的副偏角，使作用在外刃上的径向力大于作用于内刃上的径向力，使始终有一力作用在导条上，使导条发挥其支撑平衡导向作用，防止钻头钻偏。钻孔时钻尖前方形成小圆锥，可使切屑在钻尖处断离为两段，使之易于排出。



（a）腰形冷却孔钻孔范围：ϕ2~7mm　（b）双孔冷却孔钻孔范围：ϕ7~20mm

图 7－39　枪钻刀头冷却孔设计及刃磨角度

②适当改进冷却孔结构以满足冷却及排屑要求（见图 7－39）。因 $\phi 2 \sim \phi 7$mm 枪钻的直径较小，为最大限度提高其内冷却、外排屑效果，将冷却结构设计为腰形冷却孔；$\phi 7 \sim \phi 20$mm 枪钻的直径较大，将冷却结构设计为双孔冷却孔。

③在小枪钻制造时要保证夹持柄与切削刀头同轴度在 0.1mm 以内。

深小孔传统加工工艺存在需要多次退刀排屑、冷却润滑及排屑困难、生产效率低、质量稳定性差等问题。采用直槽内冷钻、枪钻等新型深小孔加工刀具的高效精密加工工艺与传统加工工艺相比，高效加工采用直槽内冷钻加工预孔，然后使用枪钻一次加工到深度，无需多次延伸钻孔，节省了多次换刀、延伸钻孔及退刀时间，有效缩短了加工流程，提高了加工效率，更为主要的显著提高了孔的表面质量，孔壁光滑，粗糙度在 $Ra2.0\mu m$ 以下，对内孔的清洁度非常有益。

7.4.2.3　多类型孔快速测量技术

（1）斜孔快速测量技术

复杂壳体孔系中有相当一部分孔是斜孔（包括单角度孔和双角度孔），目前常用的斜孔测量方法可分为两类：定性判定、定量计量，缺乏有效的现场快速检测手段。

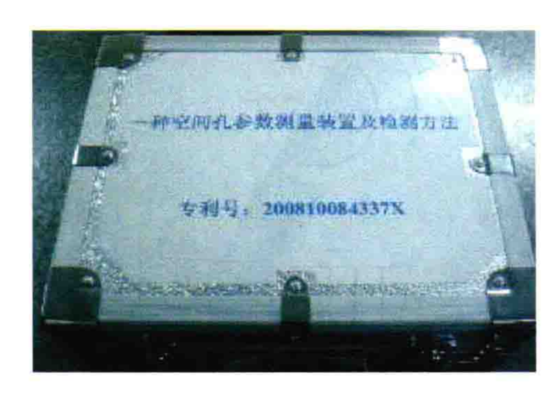
定性判定：孔口划线方法检查孔的位置，角度用角度尺测量，无法实现准确测量；

定量计量：采用测量机测量，离开现场，增加等待时间，测量费用较高。

针对舵机壳体斜孔数量多、需要现场准确测量以提高效率的特点，提出了一种空间孔参数检测算法和快速测量方法，开发了高效测量软件和斜孔快速测量装置（见图 7－40），适用于现场测量斜孔（包括单角度孔和双角度孔）的孔口中心坐标、仰角、转角以及孔深等参数，实现了壳体类零件空间孔参数的车间现场快速测量。

①斜孔/空间孔参数检测算法

斜孔/空间孔参数检测算法的原理如图 7－41，测量每个斜孔参数需要提供长短辅助测量工具距离三个基准面的距离（H_1、H_2、X_1、X_2、Y_1、Y_2）、长短辅助测量工具的球头半径（D_1、D_2）及总长度（L_1、L_2）。



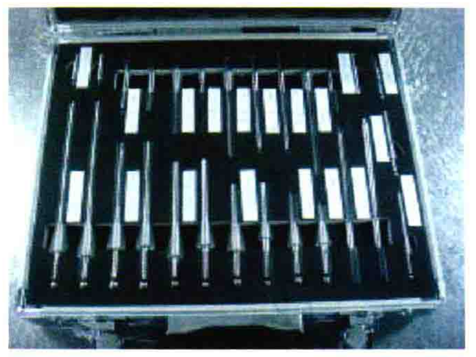


图 7－40　斜孔快速测量装置

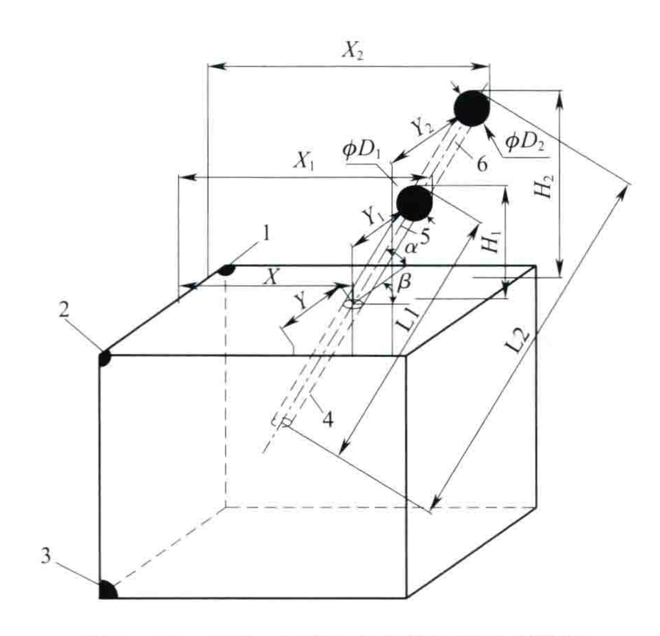


图 7－41　斜孔/空间孔参数检测算法原理图

1，2，3—三个基准面；4—被测孔；5，6—长、短辅助测量工具

孔口坐标计算：

X 坐标

$$X = \frac{(2H_2 - D_2)(2X_1 - D_1) - (2H_1 - D_1)(2X_2 - D_2)}{2(2H_2 - D_2 - 2H_1 + D_1)} \tag{7-11}$$

Y 坐标

$$Y = \frac{(2H_2 - D_2)(2Y_1 - D_1) - (2H_1 - D_1)(2Y_2 - D_2)}{2(2H_2 - D_2 - 2H_1 + D_1)} \tag{7-12}$$

仰角计算

$$\alpha = \frac{180^\circ}{\pi}\arctan\left(\frac{|(2H_2 - D_2) - (2H_1 - D_1)|}{\sqrt{[(X_2 - D_2/2) - (X_1 - D_1/2)]^2 + [(Y_2 - D_2/2) - (Y_1 - D_1/2)]^2}}\right) \tag{7-13}$$

转角计算

$$\beta = \frac{180^\circ}{\pi}\arctan\left(\frac{|(2X_2 - D_2) - (2X_1 - D_1)|}{|(2Y_2 - D_2) - (2Y_1 - D_1)|}\right) \quad (7-14)$$

深度计算

$$L = [L1 - (H_1 - D_1/2)/\sin\alpha - D_1/2 + L_2 - (H_2 - D_2/2)/\sin\alpha - D_2/2]/2 \quad (7-15)$$

式中：H_1 为短量具测量用球头面距离基准面1的距离，H_2为长量具测量用球头面距离基准面（1）的距离，X_1为短量具测量用球头面距离基准面（2）的距离，X_2为长量具测量用球头面距离基准面（2）的距离，Y_1为短量具测量用球头面距离基准面（3）的距离，Y_2为长量具测量用球头面距离基准面（3）的距离，D_1为短量具测量用球头半径，D_2为长量具测量用球头半径，L_1为短量具的总长度，L_2为长量具的总长度。

②斜孔/空间孔参数快速测量装置

斜孔快速测量装置由高度尺、测量平板和整套辅助测量工具组成。辅助测量工具是根据舵机壳体斜孔的技术要求设计的，其结构组成如图7-42所示，由标准球头（1）、标准杆（2）和测量杆（4）以及支撑保护套（3）四部分构成，当被测孔是台阶孔或锥孔时才需使用支撑保护套。装配时标准杆的一端与标准球头通过轴孔配合进行连接，另一端通过螺纹与测量杆连接。由标准球头、标准杆和测量杆装配成辅助测量工具的同轴度要好，即要求杆的中心线通过球头球心。

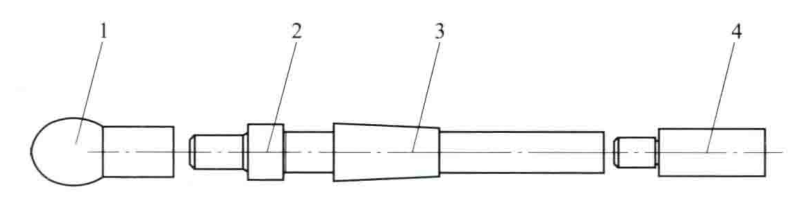


图7-42　斜孔辅助测量工具的构成

1—标准球头；2—标准杆；3—支撑保护套；4—测量杆

③斜孔/空间孔参数测量方法

根据被测孔的直径确定测量杆的直径，若需精确测量孔的深度，需要选择测量杆的直径与孔径相同；若不需要测量深度，选择量程范围内的任何测量加长杆都可。

将标准球头、标准杆、支撑保护套和测量杆装配在一起组成两根长短不一的测量杆，并测量出杆的总长以及球头直径，输入测量软件操作界面的对应位置中。

将长、短标准杆先后插入被测孔内，测出球头到三个基准面的最大距离（见图7-43），输入到测量软件中即可得到被测孔的参数。

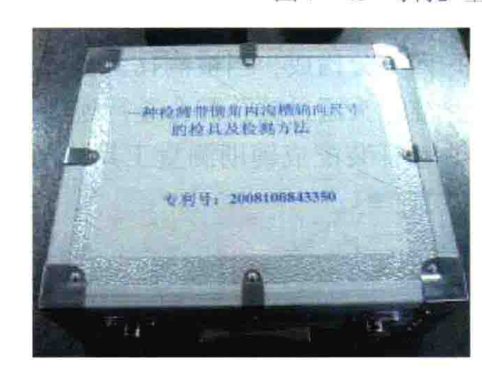
如果测量的孔是单角度孔，且已知孔的倾斜角度，只需插入一次杆并测量球头最高点到基准面的距离，即可求得孔的深度。

（2）内沟槽轴向位置快速精密测量技术

对于带倒角内沟槽的轴向位置测量，目前采用剖切分开测量方法，无法对正式件提供检测。针对带倒角内沟槽轴向位置测量的这一技术难题，发明了内沟槽轴向位置快速测量工具（见图7-44），定性判断内沟槽轴向位置的正确性。在不破坏零件本体的情况下，可以一次实现高精度孔内所有内沟槽的轴向位置尺寸检查，具有操作简单、测量效率高等特点。



图 7－43 斜孔/空间孔参数测量方法



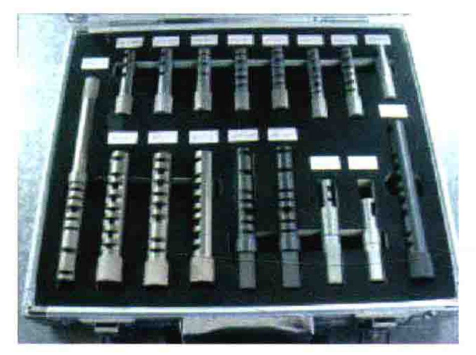


图 7－44 内沟槽轴向位置快速测量工具

①内沟槽量具结构设计

从检验使用要求出发，结合高精度孔的结构特点，检具设计成三段空心圆柱结构：辅助圆柱段（1）、定位圆柱段（2）和检测圆柱段（3）（见图 7－45）。

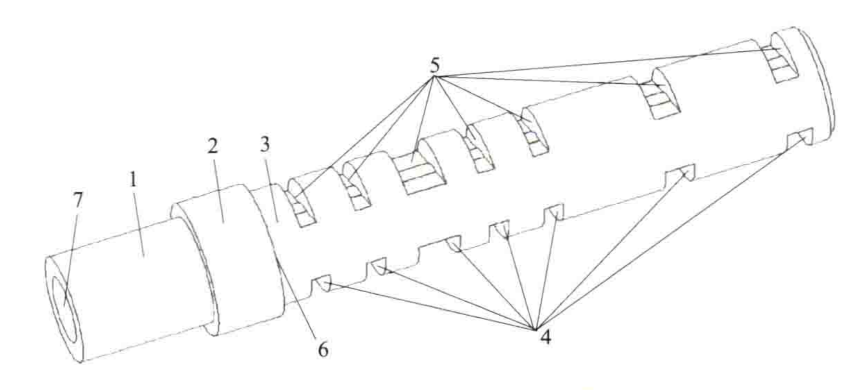


图 7－45 内沟槽量具结构图

1—辅助圆柱段；2—定位圆柱段；3—检测圆柱段；4、5—通止规检验方槽；6—定位端面；7—同轴孔

辅助圆柱段（1）裸露在高精度孔的外表面，用于安放、取出检具。定位圆柱段（2）和检测圆柱段（3）相交处的定位端面（6）与高精度孔的设计基准端面接触，确定检具在高精度孔轴线方向的位置。检测圆柱段（3）放在带有内沟槽的高精度孔内，其直径尺寸相对于被测高精度孔的直径尺寸小 $\phi 0.02 \sim \phi 0.03$mm。在检测圆柱段（3）相对 180°的

两个方向加工若干个一一对应的检验方槽（4）和（5）。一个方向的检验方槽（4）宽度按图样要求的下差加工，相对方向的检验方槽（5）宽度按图样要求上差加工，检验方槽（4）和（5）的中心位置处于图样要求的理论尺寸，则两个方向的检验方槽（4）和（5）分别为检验被测内沟槽的通规和止规。检验方槽（4）和（5）与检测圆柱段（3）形成的棱边分别为通止规的检验边。同轴孔（7）与检验方槽（4）和（5）形成的空心矩形是内窥镜检查时的检查窗口。

②内沟槽量具尺寸设计

内沟槽量具尺寸设计如图7－46所示。

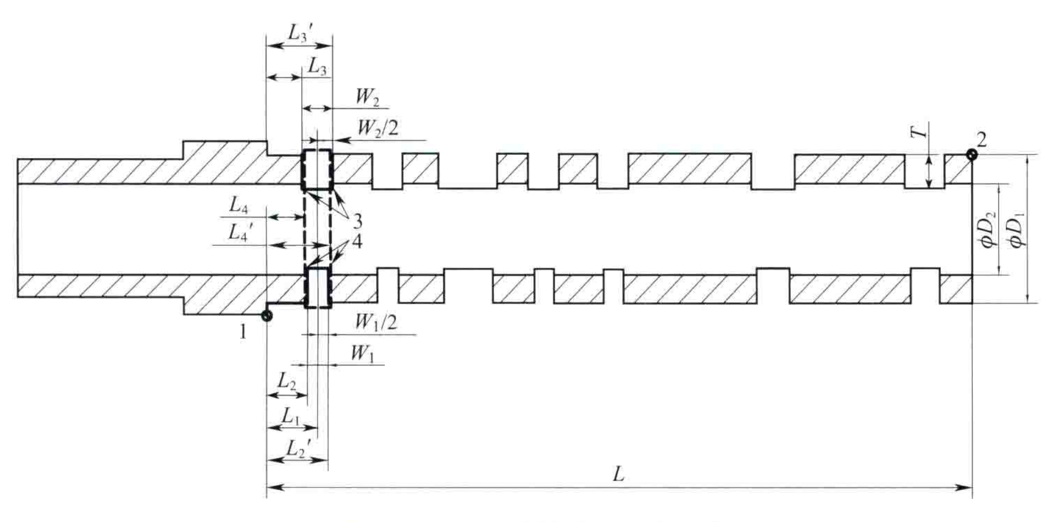


图7－46　内沟槽量具尺寸设计图

1—定位端面；2—圆柱段端面；3，4—方槽

检具外形尺寸设计：检具定位端面（1）（定位基准点）距离带方槽的检测圆柱段端面（2）的长度尺寸 L 相对于零件上被检带内沟槽精密孔的定位面距离孔底的长度尺寸小1～2mm。检具内沟槽检测圆柱段的直径尺寸 ϕD_1 相对于零件被检带内沟槽精密孔直径尺寸小0.02～0.03mm。检具中间孔的直径尺寸 ϕD_2 要大于内窥镜成像镜管的直径尺寸，比检测圆柱段直径尺寸 ϕD_1 小6mm。检具检验方槽的深度 $T=(D_1-D_2)/2+(1\sim2\text{mm})$。

检具检验方槽轴向尺寸设计：端面（1）是轴向尺寸的基准点，尺寸 L_1 是内沟槽中心距离基准点的距离，是图纸要求的理论尺寸，是检验方槽的基准位置。W_1 为最小槽宽尺寸，W_2 为最大槽宽尺寸，按尺寸 W_2 加工检验方槽（3）的两个棱边是通规检验边，按尺寸 W_1 加工检验方槽（4）的两个棱边是止规检验边，通规、止规棱边距离槽中心距离分别是 $W_2/2$、$W_1/2$。

通规、止规棱边距离轴向基准点的尺寸计算方法：

通规棱边距离轴向基准尺寸

$$L_3=L_1-W_2/2 \qquad L_3'=L_1+W_2/2 \tag{7-16}$$

止规棱边距离轴向基准尺寸

$$L_2=L_1-W_1/2 \qquad L_2'=L_1+W_1/2 \tag{7-17}$$

虚线框的两个长边为高精度孔的内沟槽两个边，距离基准的尺寸分别 L_4 和 L_4'，当：$L_3<L_4<L_2$ 且 $L_2'<L_4'<L_3'$，加工的内沟槽宽度及位置符合图样要求，即用内窥镜观察检查

时内沟槽的两个边缘在通规方槽棱边之内，在止规方槽棱边之外。

③内沟槽轴向位置快速测量方法

如图7－47所示，内窥镜（1）有光导纤维管（2）、目镜（3）、成像镜管（4）三个部分组成，在成像镜管（4）的下方是75°或90°物镜（10），可以将物镜（10）看到的物体图像经成像镜管（4）内的光学棱镜传导到目镜（3），光导纤维2将可见光传输到75°或90°物镜（10）部位，起到光源的作用。倒角内沟槽（11）检查时，将内沟槽检具（5）放入需要检查部位的被测高精度孔（6）内，检具的定位端面（7）放置在高精度孔的基准端面，检具（5）上的通规检验方槽（8）、止规检验方槽（9）处于图样要求的理论状态，并与高精度孔带倒角内沟槽具有确定的位置关系。将内窥镜（1）插入检具的中心孔，将成像镜管（4）下方的75°或90°物镜（10）移动到所需要检查的内沟槽（11）位置，通过观察窗口检查内沟槽（11）上下边缘与检具通规、止规的两个检验边（12）的关系，判断内沟槽（11）的位置及宽度是否合适。

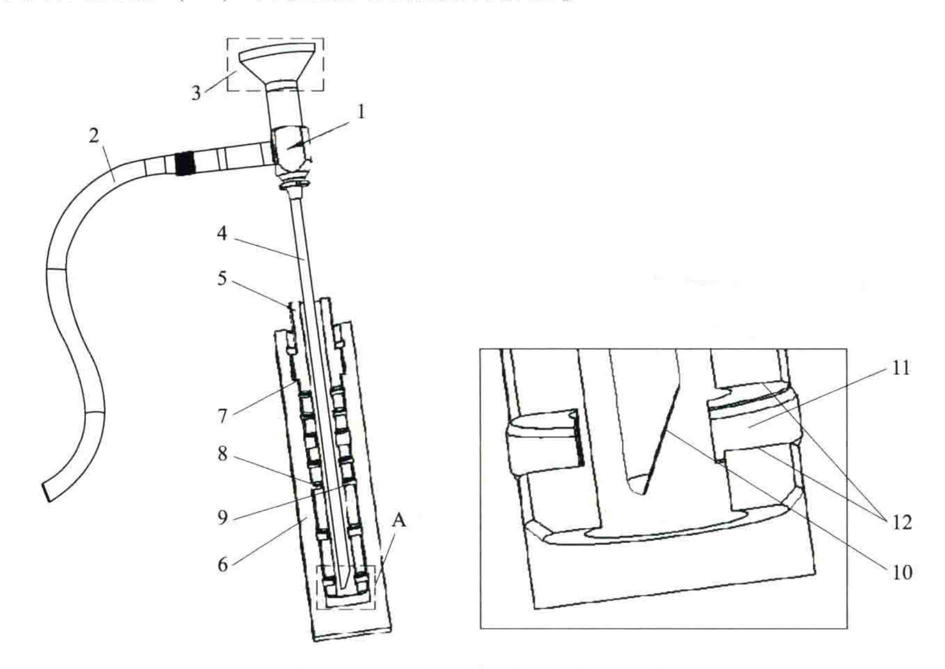


图7－47　内沟槽检测过程示意图

1—内窥镜；2—光导纤维管；3—目镜；4—成像镜管；5—内沟槽检具；6—被测高精度孔；7—检具定位端面
8—通规检验方槽；9—止规检验方槽 10—物镜；11—被测内沟槽；12—检验边

在内沟槽轴向位置的测量过程中采用内沟槽轴向位置快速测量技术，结合使用内沟槽专用检具和内窥镜，在不破坏零件本体的情况下，可以一次实现高精度孔内所有内沟槽的检查，定性判断其合格性，大幅缩短检验时间，相对于剖切开零件采用普通方法检查，检查时间缩短30%～40%左右，相应也减少机床的待检时间，提高生产效率。并且采用此方法可以针对每个零件进行检测，有利于生产过程的实时监控，适合批量的生产实现。

（3）内嵌式腔槽位置精确测量技术

针对复杂壳体电火花孔、偏心槽位置尺寸、孔口倒角尺寸等内嵌式腔槽位置的测量难点，开发0.05mm精度级内嵌式腔槽位置测量仪（见图7－48），可以实现孔内所有内嵌式腔槽位置尺寸的准确测量，并且能够快速提供准确、可靠的测量数据。



图7-48　内嵌式腔槽位置测量仪

①内嵌式腔槽位置测量仪整体设计

内嵌式腔槽位置测量仪整体结构如图7-49所示：测量仪由工作平台（1）、电子数显高度尺（2）和安装分划板的90°内窥镜（3）组成。

工作平台是测量仪的基础部件，其上下两个大面的自身平面度0.005mm，它们相互平行度0.005mm。90°内窥镜前端的物镜（5）采用的是直角棱镜（6），可将平行光路（7）转换成与之呈90°垂直的垂直光路（8），即通过直角棱镜改变光路功能，眼睛可以沿孔轴线方向直接观察孔壁。在直角棱镜（6）的前方安装一个平行平板玻璃做成的分划板（9），其上刻有宽度0.02mm左右的两条相互垂直刻线（10）和（11），其中刻线（10）与内窥镜镜管（4）轴线垂直，刻线（11）与内窥镜镜管轴线（4）平行。与90°内窥镜镜管轴线（4）垂直的刻线（10）起瞄准作用，是确定内嵌式腔槽位置的基准定位线。将安装分划板（9）的90°内窥镜（3）安装在电子数显高度尺（2）上，其内窥镜的镜管（4）与工作平台的大面垂直，即与内窥镜镜管轴线垂直的刻线（10）平行于工作平台的大面，利用数显高度尺的测量、读数功能，实现内嵌式腔槽的轴线位置准确测量。

②内嵌式腔槽位置测量仪的使用方法

如图7-49所示，采用测量仪检测内嵌式腔槽位置的方法是，将零件放置在测量仪的工作平台上，被测内嵌式腔槽所在精密孔的轴线与工作平台大面垂直，将装配有分度板的90°内窥镜放入被测精密孔内，通过电子数显高度尺的滑尺带动90°内窥镜上下移动，让90°内窥镜物镜前方分度板中与工作台大面平行的刻线分别与零件的基准面和被测内嵌式腔槽的边缘对齐，其中刻线对准位置尺寸的基准面时，按下置“0”功能按钮，电子显示器显示数值“0”，即电子数显高度尺在此位置设置基准零位，也是内嵌式腔槽位置尺寸的基准零位；刻线对准被测内嵌式腔槽的边缘时，电子数显高度尺的电子显示器显示数值就是内嵌式腔槽位置尺寸。

7.4.2.4　复杂壳体零件去毛刺技术

复杂壳体类零件对毛刺去除及孔内清洁度要求高，孔内交叉孔毛刺多，去除难度大。一般采用手工去毛刺的方法，主要借助于照明元件、内窥镜等工具的观察，用自制的手工工具实现外观和孔毛刺的去除，效率低且易出废品。

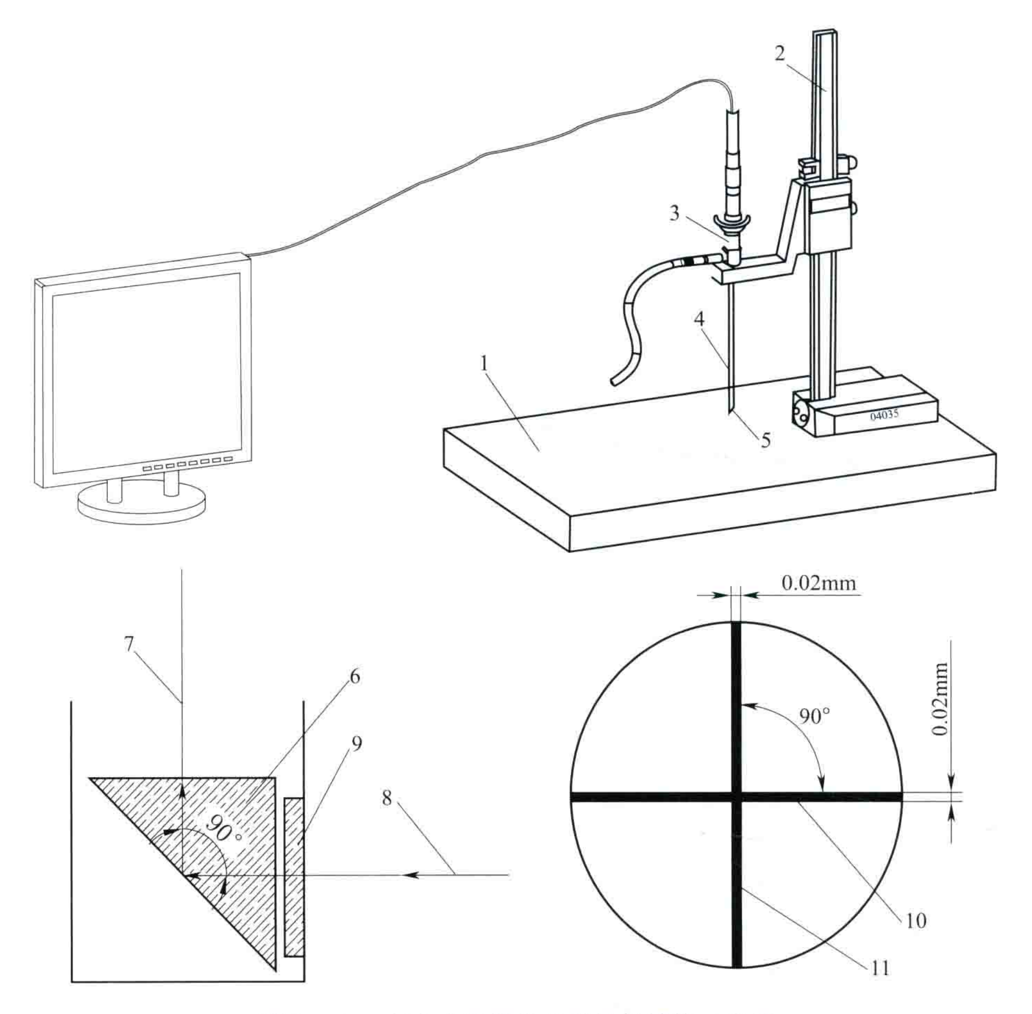


图 7-49　内嵌式腔槽位置测量仪结构示意图

1—测量仪由工作平台；2—电子数显高度尺；3—安装分划板的 90°内窥镜；4—内窥镜镜管；
5—内窥镜前端的物镜；6—直角棱镜；7—垂直光路；8—平行光路；9—分划板；10，11—分划板刻线

（1）超声波复合去毛刺机理

针对深小孔交叉处部位毛刺去除的技术难题，根据超声波复合去毛刺原理，开发出小型化手持式深小孔超声复合去毛刺装置，这一装置具有操作简单、去毛刺效率高等特点，能够均匀、有效去除孔内毛刺及孔壁修光，加工质量易于保证和控制，有效提高了深小孔去毛刺的效率和质量。

超声波复合去毛刺是一种利用超声能量进行加工的高新技术，即把超声能通过加工介质（磨料和加工工具）对零件进行加工的方法，其原理如图 7-50 所示：将 50Hz 交流电转化为超声频的机械振动，通过变幅杆将该振幅放大，传递给振动传递杆，带动其上的超硬磨料产生纵向振动，以很大的速度不断冲击被加工表面，产生极大的单位面积压力，使材料变形、破裂、成为无数微粒被切离下来，达到去除交叉孔毛刺的目的。

（2）Y 形弹性超声波去毛刺工具设计

Y 形弹性超声波去毛刺工具是一细长金属棒，采用工具钢材料制成，如图 7-51 所示。因 Y 形超声波去毛刺工具具有弹性，按照其直径 ϕD_1 比需要去毛刺小孔直径小 $\phi 0.2$mm 的设计原则，每只去毛刺工具均能够适用于一定孔径范围内的深小孔去毛刺。

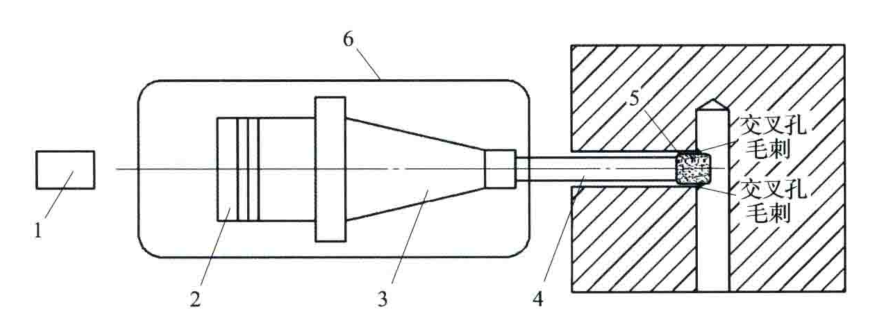


图7-50　超声波复合去毛刺原理图

1—超声波发生器；2—换能器；3—变幅杆；4—振动传递杆；5—超硬磨料；6—外壳

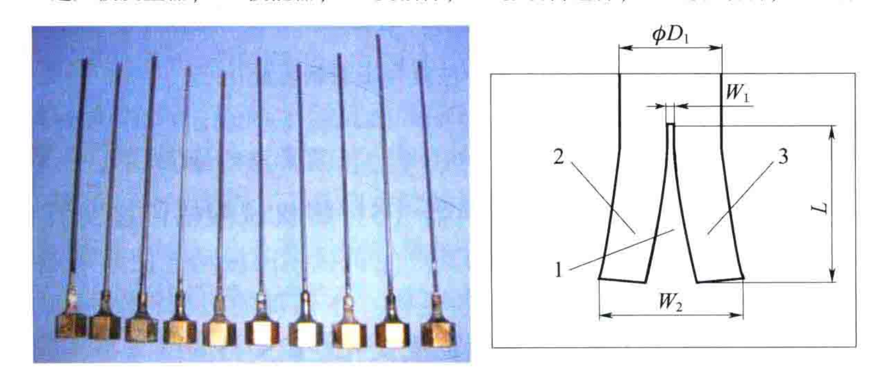


图7-51　Y形弹性超声波去毛刺工具

1—通透开口矩形槽；2，3—Y形弹性分支部分

在Y形弹性超声波去毛刺工具前端有通开口矩形槽，该槽相对于金属棒外圆中心对称。通透开口矩形槽的宽度为0.25～0.3mm，矩形槽的深度L为金属棒直径尺寸ϕD_1的3～5倍，由于通透开口矩形槽的存在，在金属棒的前端形成的两个分支部分2和3会自然具有一定弧度的弯曲变形，且两个分支部分的弯曲变形完全一致，并具有弹性。金属棒的前端沿变形方向的尺寸W_2会增大，其尺寸比需要去毛刺小孔的直径大ϕ0.2mm，形成前端粗、后端细的结构，可以保证在去交叉孔部位毛刺时，始终是专用去毛刺工具前端接触到毛刺并对其去除，金属棒其余部分则不接触孔壁，不会对孔造成不必要的伤害。

（3）超声波复合去毛刺装置

为了使用的方便及快捷，我们做了各种小型化集成和创新，将超声主要部件振动转换器集成在ϕ70mm×100mm的空间内，研制出小型化手持式深小孔超声复合去毛刺装置，以利于操作人员手持工作。超声波复合去毛刺装置如图7-52所示：由工作台（1）、固定支撑架（4）、振动发生器（2）、装有专用去毛刺工具（3）的振动转换器（6）、深度指示部件的指示器（7）和标尺（9）及研磨粉输送部件的流量控制开关（10）、水容器（11）、管道（12）、研料容器（13）、研磨微粉（14）组成。

工作台（1）是整个装置的基础部件，用于放置装置的其它部件，也是用于放置零件实现去毛刺过程的工作平台。工作台（1）上装有固定支撑架（4），其上固定安装有标尺（9）和可以伸缩的钢带（8）。钢带（8）前端与振动转换器（6）连接。利用钢带（8）的伸缩功能可以带动振动转换器（6）上下移动，适应不同深度去毛刺的要求。在钢带（8）上有一个指示器（7），它与标尺（9）共同组成了深度指示部件，可以确定去毛刺部位的区域和深度。振动发生器（2）通过电缆（5）与振动转换器（6）连接。当振动发生

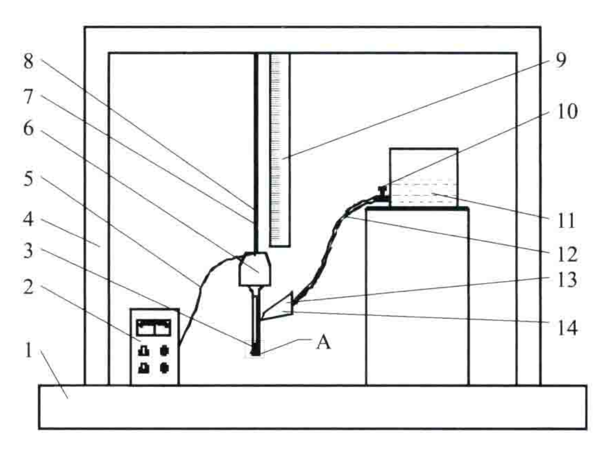




图 7－52　超声波复合去毛刺装置

1—工作台；2—振动发生器；3—专用去毛刺工具；4—固定支撑架；5—电缆；6—振动转换器；7—指示器；8—钢带；9—标尺；10—流量控制开关；11—水容器；12—管道；13—研料容器；14—研磨微粉

器（2）产生不同频率振动，通过振动转换器（6）将机械振幅传递安装在振动转换器（6）前端的专用去毛刺工具（3）上，带动其产生机械纵向振动，使其通过深小孔交叉部位时，以很大的速度不断冲击交叉处产生的毛刺，在毛刺的根部产生极大的单位面积压力，迫使毛刺从零件本体切离下来，达到去除交叉孔毛刺的目的。

在去毛刺过程中，为进一步提高去毛刺部位的表面质量，将水容器（11）内的水通过流量控制开关（10）、管道（12）流入装有高硬度的研磨微粉（14）的研料容器（13），流量控制开关（10）可以控制水流量的大小。研料容器（13）的前端对准需要去毛刺的小孔孔口，在水流的作用下将研磨微粉输送到去毛刺部位，研磨微粉在专用去毛刺工具（3）的带动下，也会以与机械振动相同的频率冲击被加工表面，对已经去除毛刺的部位进行捣实，除去或改造工件表面原有的损伤层，并在其下面构成新的表面加工层，消除工件表面的加工痕迹，完善去毛刺的表面质量。

（4）超声波复合去毛刺方法

将零件放置在工作台（1）上，操作人员手持前端安装专用去毛刺工具（3）的振动转换器（6），将专用去毛刺工具（3）放入需要去毛刺的小孔内，根据图样所示交叉部位的深度，移动专用去毛刺工具（3）到此深度，上下移动，同时适当转动，这时可以通过指示器的读数确定去毛刺的区域及深度。启动振动发生器（2），它通过振动转换器（6）将机械振幅传递安装在振动转换器（6）前端的专用去毛刺工具（3）上，带动其产生机械纵向振动。专用去毛刺工具（3）前端的两个分支部分在进行机械纵向振动时，通过深小孔交叉部位，以很大的速度不断冲击交叉处产生的毛刺，将毛刺从零件本体上切离下来，达到去除交叉孔毛刺的目的，在此去毛刺过程中，研磨微粉流入到去毛刺部位，同时在专用去毛刺工具（3）的带动下，以与机械振动相同的频率冲击被加工表面，对已经去除毛刺的部位进行捣实，除去或改造工件表面原有的损伤层，并在其下面构成新的表面加工层，消除工件表面的加工痕迹，完善去毛刺的表面质量。

（5）超声波复合去毛刺技术应用效果

在 ϕ3mm 以下深小孔、交叉处毛刺的去除过程中使用超声波复合去毛刺装置，与手工去毛刺方法相比具有明显优势：





图7-53 超声波去毛刺效果（试验样块剖切）
1—毛刺去除均匀、干净；2—对孔表面顺光、去除多余物

①操作简单，操作人员容易掌握技术要领；

②可以加工手工刀具难以达到的部位，并将工具经过的孔内所有交叉孔毛刺去除；

③人为和环境的影响因素小，毛刺去除均匀、彻底，加工精度和加工质量易于保证和控制，毛刺去除程度一致，去毛刺部位的形状保持一致；

④适合加工复杂壳体零件中小孔径、大长径比的孔，尤其是 ϕ3mm 以下的孔；

⑤去毛刺速度快，加工效率提高 50% ~70% 以上。

⑥能对孔表面进行光整处理，以去除孔表面不光洁处，提高其清洁度。

7.5 微波铁氧体器件的精密加工技术

7.5.1 概述

铁氧体是一种具有优异磁性能的材料，功率损耗小，磁通密度高，耐温、耐湿、抗振、性能稳定，常被制作成微波器材，可用于雷达、通信、无线电导航、电子对抗、遥控、遥测等微波系统以及微波测量仪器中。铁氧体一般是指以氧化铁和其他铁族元素或者稀土族氧化物为主要成分的复合磁性氧化物，又称磁性瓷。随着微波技术的不断发展，铁氧体器件以其合适的介电参数和极低的微波损耗性能成为微波系统关键器件的发展主流。

在军事领域，随着相控阵制导技术以及新时期军事形势发展，精确制导系统对微波及毫米波器件的需求数量急剧增加，武器装备对小型化特种器件的性能要求越来越高，需求量也越来越大。相控阵雷达是铁氧体材料及器件应用较为广泛的领域。目前，空间监视与导弹预警雷达、战区弹道导弹预防雷达、战术防空雷达、舰载多功能雷达、多目标精密跟踪雷达、机载预警、火控、战场监视、战场侦察雷达等几乎都采用了相控阵体制的雷达。相控阵雷达分有源和无源两种，有源相控阵雷达的每个天线单元中都有一个发射/接受（T/R）组件，而铁氧体环形器/隔离器是该组件中重要器件之一，这些铁氧体器件在相控阵雷达中起着独特的作用。一部相控阵雷达的天线单元数少则几十上百，多则成千上万，如美国 F-22 战斗机的 AN/APG-77 雷达（如图7-54 所示）有 2000 个铁氧体 T/R 组件，俄罗斯为新一代战斗机配备的“掩体”相控阵火控雷达装有 3000 个铁氧体移相器。

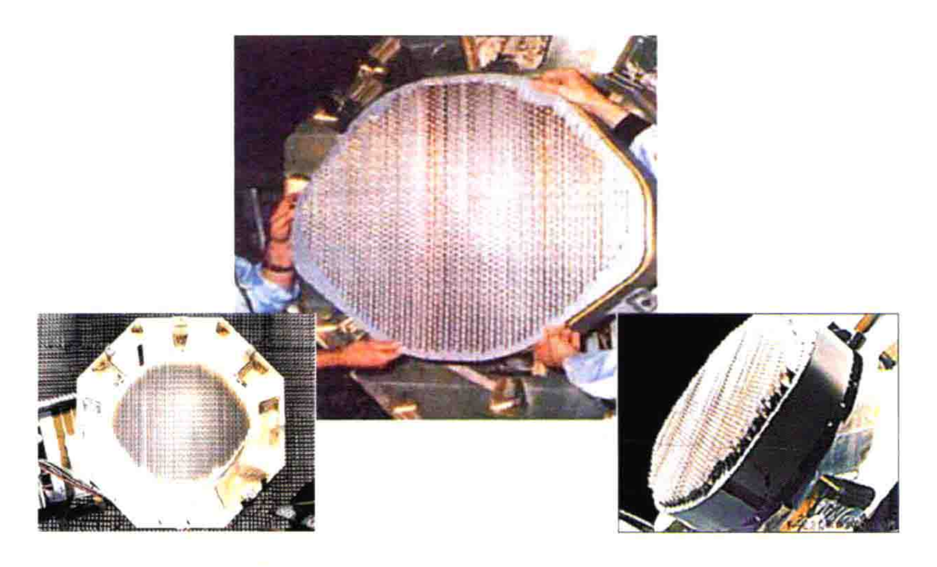


图 7－54　F－22 AESA 雷达 APG－77

世界主要发达国家，特别是美国和俄罗斯，非常重视大型相控阵雷达系统的研制和应用，从而促进了电子战和空间技术的迅速发展。在此领域内，铁氧体移相器和开关起着非常关键的作用。据统计，美国在世界各地部署了 200 多个有这种相阵体制的雷达系统。其次，空军预警机天线、单脉冲精密跟踪测量雷达等也要使用大量铁氧体移相器。海湾战争中，美国的“爱国者”导弹之所以威力显赫，主要依靠了相控阵雷达技术，使各国进一步认识到了大力发展铁氧体移相器和开关的重要性和迫切性。到目前为止，国外应用铁氧体移相器的相控阵雷达已达几十种。

我国已经开展了相控阵雷达的研究，尤其是有源相控阵雷达已经成为下一代火控雷达发展的必然趋势，是新一代战斗机的主要标志。但相对于一些陆基、舰载的大型雷达来说，由于机载雷达对体积和重量的限制更为严格，其技术难度要大得多，其主要难度集中在小体积铁氧体 T/R 组件的制造上，这是因为雷达的工作波长短，对铁氧体材料的尺寸较敏感，所以保证高的加工精度的同时，还需要保证零件的一致性，才能实现雷达的最终使用要求。因此作为实现相控阵雷达功用的基础元件，有必要解决铁氧体材料的精密加工制造技术这一难题，促进我国新一代战斗机的发展。

7.5.2　铁氧体材料的研究现状

7.5.2.1　铁氧体材料的物理/力学性能分析

铁氧体是由铁和其他一种或多种金属组成的复合氧化物。也可以理解为一种具有铁磁性的金属氧化物，目前已经出现一些不含铁离子但却具有磁性的金属氧化物和硫属化合物，如氧化镍（NiO）、氧化铕（EuO）、稀土硫属化合物硫化铕（EuS）和硫属铬酸盐以及铁属的卤素化合物氟化铁等都是近年发展起来的磁光材料或磁性半导体材料，也属于广义铁氧体的范畴。

像铁磁材料一样，铁氧体在没有外场下也呈现自发极化，它们由自饱和畴组成，并显示磁滞特性行为。铁氧体的磁特性还表现为高频时具有较高的磁导率，这是金属磁性材料包括坡莫台金、铝硅铁合金等所不能比拟的。就电特性来说，不仅铁氧体的电阻率比金属

磁性材料大得多，而且还有较高的介电性能。

在生产工艺上，铁氧体类似于一般陶瓷工艺，操作方便易于控制，不必像金属磁性材料那样要轧成薄片或制成细粉介质才能应用；铁氧体的晶体结构允许其化学组分可在较宽范围内变化，从而使工艺学家能有较大的余地来调控材料的性能，陶瓷制备技术允许从经济角度制作各种形状和尺寸的器件。

铁氧体的力学物理特性有很多，例如硬度、弹性模量、韧性、抗折强度、抗拉强度、抗压强度等，这些特性与铁氧体的加工性有着密切的关系。表7－3给出了几种铁氧体的力学物理特性及其他性能。由表中数据可见，随着铁氧体的种类、组成以及制造工艺的不同，铁氧体的力学物理特性也不尽相同。

表7－3 几种铁氧体材料的力学物理性能

铁氧体系列	烧结密度/(g/cm^3)	弹性模量/MPa	抗拉强度/MPa	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa
$BaFe_{12}O_{19}$	4.6～5.1	1.5×105	30.6～91.8	20.4～51	>71.4
$SrFe_{12}O_{19}$	4.6～5.0	1.5×105	30.6～91.8	20.4～51	>71.4
Mg－Zn	4.3～4.73		120～180		
$N_1Fe_2O_4$	4.3～5.11		58～91.8		
N_1－Zn	3.85～4.93		32.9～87.5		
Mn－Zn	～51	～65	130		

材料的力学性能主要研究材料在外力作用下发生弹性或塑性形变，材料抵抗形变的能力和材料失效或被破坏的规律。铁氧体材料从结构特点上来说，晶体的刚性强，材料总体上硬度高，耐磨损，耐高温和耐腐蚀。但是脆性大，塑性差，不易进行加工，抗热震性也较差，强度分散。对这类材料施加载荷时，内部或表面的裂纹容易扩展并将引起应力集中，使材料发生突然性的断裂。

综上所述，由于铁氧体性能好，成本低，工艺简单，又能节约大量贵金属，因而已成为高频弱电领域很有发展前途的一种非金属磁性材料。

7.5.2.2 铁氧体材料的加工工艺

国外在研发铁氧体材料时已经采用少余量和近无余量的制备技术，以使在结构零件和功能件的制造过程中，能将必需的加工余量控制到最小。但是就大多数零件而言，它们所需的尺寸形状精度、表面粗糙度和表面完整性的要求最终仍然必需经由机械加工提供保证。美国针对F－22批量生产的需要，建立了铁氧体零件自动化生产线，从制坯到零件加工全过程流水线作业，能够高效生产出高精度的铁氧体零件。

美国最早研制了能加工硬脆材料的六轴数控超精密研磨抛光机；劳伦斯－利弗莫尔国家实验室还开发了能加工陶瓷、硬质合金、玻璃和塑料等难加工材料的超精密切削机床，在半导体行业、航空工业和医疗器械工业中投入使用；英国克兰菲尔德大学精密工程研究所相继研制出能加工大型非球面反射镜的数控金刚石立式车床、加工大型非对称结构光学零件的数控超精密磨床，并研发了脆性材料的超精密磨削工艺。随着微波技术的不断发

展，半导体微波基片更广泛适用于民用微波通信技术，而铁氧体与陶瓷微波基片以其合适的介电参数和极低的微波损耗性能成为军用微波系统中微波基片的发展主流，并且在美、英、俄等国也有不少的应用实例。在美国国防部的研究计划中，微波铁氧体基片的制造及过程控制被列为重点研究项目，要求在海、陆、空所使用的毫米波功率器件、毫米波移相器等雷达系统中全面采用装备有微波基片制造的高性能微波器件，大幅度改善军用武器的性能。

国内对铁氧体的制造，主要集中在民品，即利用模具制成各种形状的磁芯，应用于各种电感器、变压器、轭流器、电磁干扰一致器、滤波器、电子镇波器、电波吸收材料、倍频器、调制器等工业自动化设备及电子仪器仪表、通信设备、计算机及外围设备，其加工艺简单，加工精度要求不高。

目前国内磁材行业为了完成磁芯磨削、抛光工艺，主要采取以下几种方式：

一是在磨床上经过粗磨，达到尺寸精度后，再上研磨机进行研磨，研磨过程需要配上研磨膏、润滑剂等辅助材料。

二是在大型立轴平面磨床上用砂瓦粗磨后撒抛光粉（如氧化铬氯粉等）干磨，粗磨精磨一气呵成，操作方便，但表面粗糙度差，因而电感 L 值下降 30% ~50% 。

三是采用国际先进水平的磁芯抛光专用设备（如通过式镜面磨床、双透镜面磨床等），效率较高，操作方便，光洁度很高，电感 L 值降低约在 5% ~10% 之间，但生产设备昂贵，砂轮耐用度低，产品的生产成本高。

对于军品所使用的铁氧体器件，如相控阵雷达的铁氧体器件，零件整体尺寸小，制造公差严格，要求一致性好，则民品的制造加工工艺不能满足要求。在军工领域，多家单位针对地对空相控阵雷达研制的需要，开展了关于铁氧体零件磨削加工的研究，由于地对空相控阵雷达尺寸大，其上所用铁氧体零件相对航空机载相控阵雷达来说，精度要求不高，制造难度也相对较小。而且对于进一步的精加工，如研磨、抛光、珩磨等工艺研究较少。

7.5.3 铁氧体材料精密高效磨削

铁氧体材料从结构特点上来说，晶体的刚性强，材料总体上硬度高，耐磨损，耐高温和耐腐蚀，但是脆性大、塑性差，不易进行加工，抗热振性也较差，强度分散。对这类材料施加载荷时，内部或表面的裂纹容易扩展并将引起应力集中，使材料发生突然性的断裂。

7.5.3.1 新型钎焊金刚石镶块砂轮的制作

由于铁氧体材料的导热系数低、热传导慢，磨削过程中产生的磨削热无法及时散发，在铁氧体表面大量的积聚，极易造成铁氧体加工表面出现剥落点的掉渣，影响磨削加工表面完整性。铁氧体材料又属于高硬脆材料，一般的砂轮无法进行加工。针对于此，设计制作了专用的单层钎焊金刚石镶块砂轮，实现铁氧体材料的高效磨削。

单层钎焊金刚石镶块砂轮是利用钎焊的化学冶金结合，改善磨料、钎料、基体三者间的结合强度，由于高温钎焊所提供的界面上的结合强度高，仅需将磨料间结合层厚度维持在磨料高度的 20% ~30% 的水平上就能在大负荷的高速高效磨削中牢固地把持住磨料；同时因为结合层厚度很薄，钎焊砂轮可使磨料裸露高度达到磨料高度的 70% ~80% ，磨料间的容屑空间被大大扩展，不易堵塞，有效磨料切刃更多、更锋利，磨削比可大大降

低，磨除单位体积的金属所产生的热量减少，再加上大的容屑空间可有效容纳较多的磨削液，使磨削温度大大降低，可有效防止磨削烧伤，尤其是在高效磨削中更能显示出其无可比拟的优势。

单层钎焊金刚石砂轮由金刚石磨料、结合剂、基体三部分组成，多边形体为金刚石磨料，颗粒状区间为钎料 Ni－Cr 合金，其作用是将金刚石磨料牢固地黏合在基体上，保证磨料能磨削。底部四方体为基体，承担负荷工作层的作用。钎焊前对砂轮基体、金刚石和陶瓷压片进行常规清洁处理。钎焊采用二次钎焊工艺，首先在工具基体上用高温钎焊一层钎料，再修磨钎料层至金刚石磨料颗粒的 1/3 厚度，在钎料层上均匀有序地排布金刚石，上面用环形陶瓷压住。按此程序，排布好金刚石的镶块及陶瓷压片，然后进行第二次高温真空钎焊，焊接后保温。镶块安装完成后的砂轮如图 7－55 所示。整个金刚石砂轮由法兰、夹具把砂轮牢固地装在加工机床的主轴上。

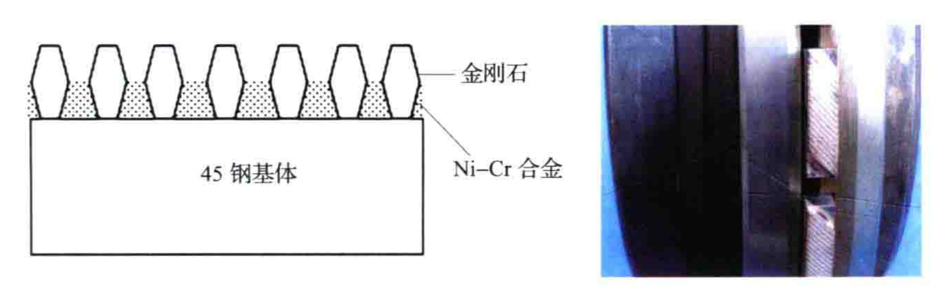


图 7－55　新型金刚石钎焊砂轮

7.5.3.2　铁氧体精密高效磨削试验方案

为评价钎焊金刚石镶块砂轮平面磨削铁氧体材料的性能，进行了如下平面磨削铁氧体材料的试验方案，分析磨削用量对铁氧体材料加工的磨削力和表面粗糙度的影响，其磨削条件如表 7－4 所示。

表 7－4　钎焊金刚石镶块砂轮磨削试验条件

磨削方式	反复式磨削
磨床	精密靠磨卧轴矩台平面磨床 MMD7125，工作台工作面宽度度 250mm，长度 1000mm
工作台速度	进给速度 v_w 为 0.3～1.5m/min
砂轮主轴电机	无级调速，转速范围 0～3000r/min
冷却润滑条件	5% 水基乳化液，冷却泵流量 60L/min
砂轮	单层钎焊金刚石镶块砂轮，外径 260mm，宽度 6mm
磨料粒度	金刚石磨料 SMD140/170 目
磨削力测试系统	压电晶体测力仪 KISTLER9265B 以及相应的数据采集与处理系统，仪灵敏度 0.05N，量程 ±15kN（X、Y、Z），刚度 1μm/kN
粗糙度测量仪器	表面粗糙度仪 MahrMarSurf PS1，测量技术参数：扫描长度 L_t 为 1.750mm，截至波长 L_c 为 0.250，取样数 n 为 5
显微镜	HIROX 三维视频显微镜，MX－5040RZ，镜头 DIGTAL MicoscopeKH－770
扫描电镜（SEM）	日本电子公司（JEOL）JSM－6300 型扫描电镜

试验中，分别改变磨削深度、工件速度、砂轮速度进行单因素试验。使用表面粗糙度仪 MahrMarSurf PS1 测量微波铁氧体磨削表面后的表面粗糙度，KISTLER9265B 三向压电晶体测力仪和放大器 5019A 测量磨削力，试验系统如图 7－56 所示。

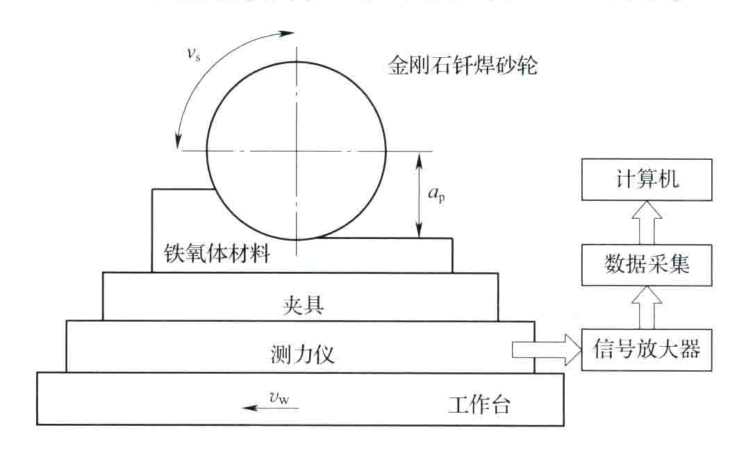


图 7－56　磨削试验装置示意图

7.5.3.3　试验结果和分析

（1）磨削工艺参数对磨削力的影响

在实际磨削中，磨削深度 a_p 增大时，不仅使每颗粒的未变形切深厚度增大，还使砂轮与工件的磨削接触弧长加长，因而使径向力 F_n 和切向力 F_t 增大，如图 7－57 所示。

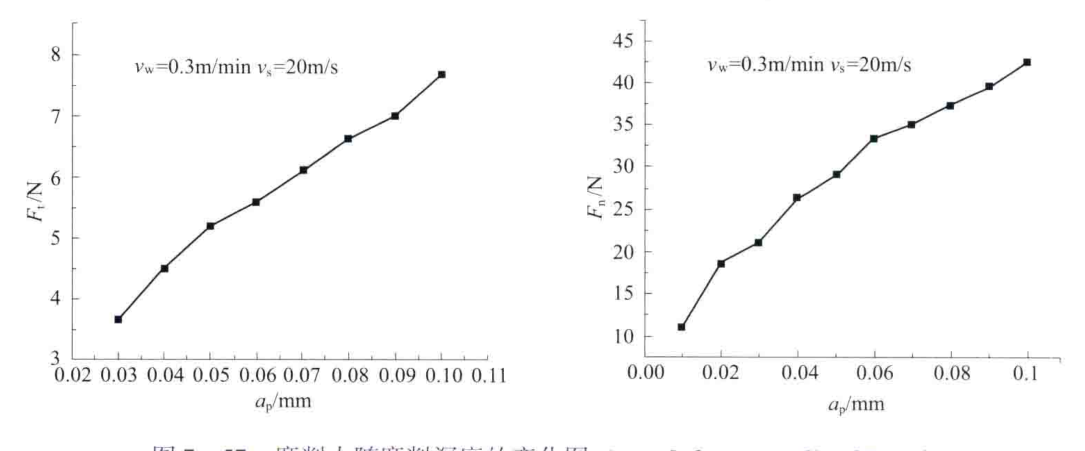


图 7－57　磨削力随磨削深度的变化图（v_w =0. 3m/min，V_s =20m/s）

随着磨削速度的增大，法向磨削力和切向磨削力均减少，但趋势逐渐变缓，这主要是因为磨削速度的增大，一方面使磨粒的实际切削厚度减少，降低了每磨粒上的磨削力，另一方面产生了高温，提高了微波铁氧体材料的断裂韧性，增加了塑性变形。因此适当增大磨削速度，既可以增强磨削砂轮的自锐性，获得较高的去除率，又可以增加塑性变形，改善工件的表面质量。但是磨削速度不能太大，太大会增加砂轮的热磨损，引起砂轮黏结颗粒的脱落，并且还会引起磨削系统的振动，增加加工误差，亦不能太小，太小则会增加每切削刃上的切深，导致磨粒碎裂和脱落。当砂轮速度 v_s 增大时，单位时间内参加切削的总磨粒数增多，使每颗磨粒的未变形切屑厚度减少，但当速度增大超过某一临界值时，径向力 F_n 和切向力 F_t 随砂轮速度的增大而增大（如图 7－58 所示），这主要是由于砂轮主轴高速运转产生的振动造成的。

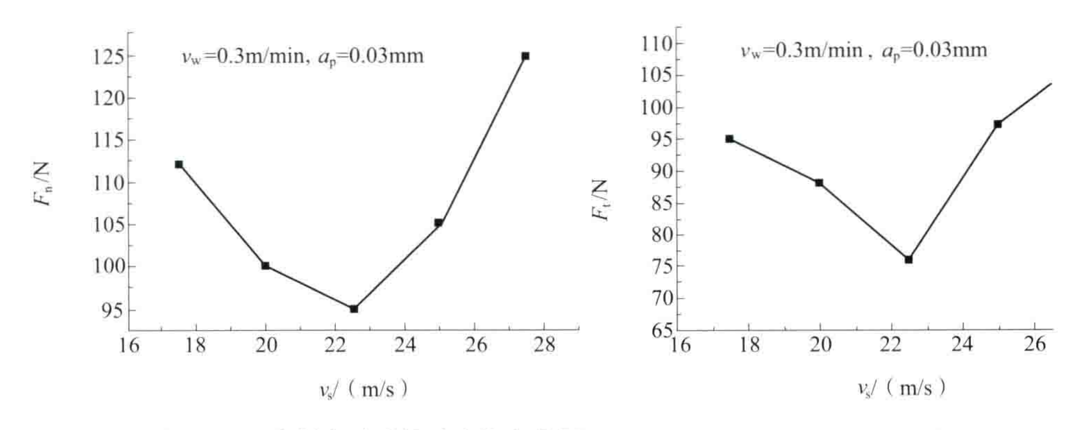


图 7－58　磨削力随砂轮速度的变化图（v_w = 0. 3m/min，a_p = 0. 03mm）

工件速度 v_w 增加时，每颗粒的未变形切屑厚度增大，因而使径向力 F_n 和切向力 F_t 增大，如图 7－59 所示。

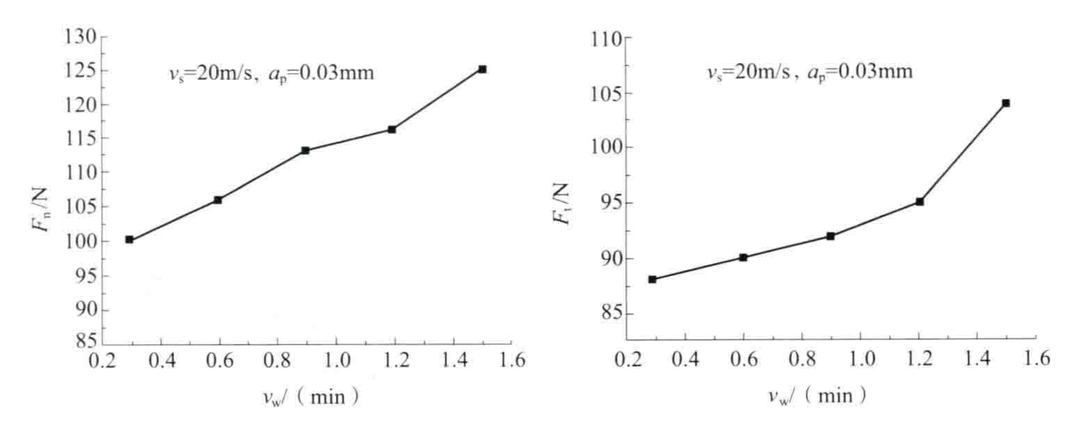


图 7－59　磨削力随工件速度的变化图（v_s = 20m/s，a_p = 0. 03mm）

换算成材料去除率，单位时间内单位砂轮宽度上材料磨除率与单位磨削宽度法（切）向磨削力曲线如图 7－60 所示。

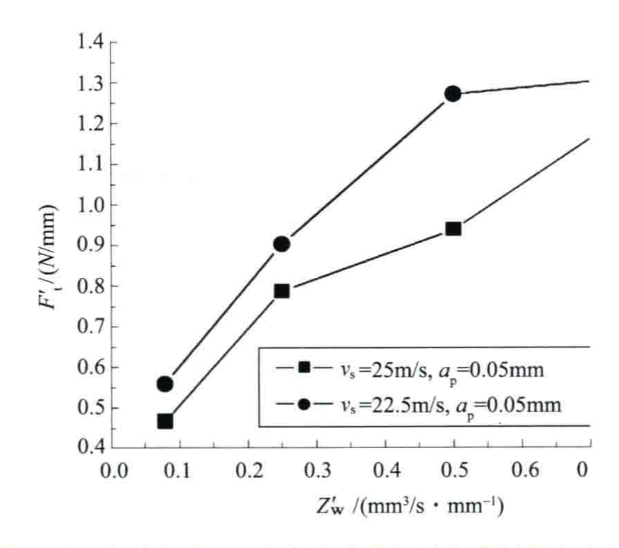


图 7－60　单位时间内单位宽度上材料磨除率与单位磨削宽度法向磨削力曲线

（2）微波铁氧体磨削表面微观形貌的观察

表面形貌分析技术是研究已加工材料损伤情况、材料去除方式的重要方法。通过对零件磨削表面的形貌分析，可以得到表面微观不平度、表面材料变质层、表面/亚表面裂纹损伤系统等缺陷产生的原因、形成机理及材料去除方式，同时验证研制的新型钎焊金刚石镶块砂轮的使用效果。

图7－61中左图为微波铁氧体磨削表面形貌，右图为左图中黑色方框内的局部放大图，以便观察表面的SEM形貌。从图中可以看出，光滑平整的磨痕占多数，材料的去除是断面呈现亮白色，完整表面呈现暗色，以均匀连续的显微塑性流动完成的，但在断裂的脆崩坑内存在着微裂纹。已磨削表面除裂纹外，还有材料的气孔，右图中颜色深黑的部分为工件材料的气孔。磨削裂纹可归因于磨削热应力和因组织偏析使晶界能降低而引起晶界断裂的双重作用。

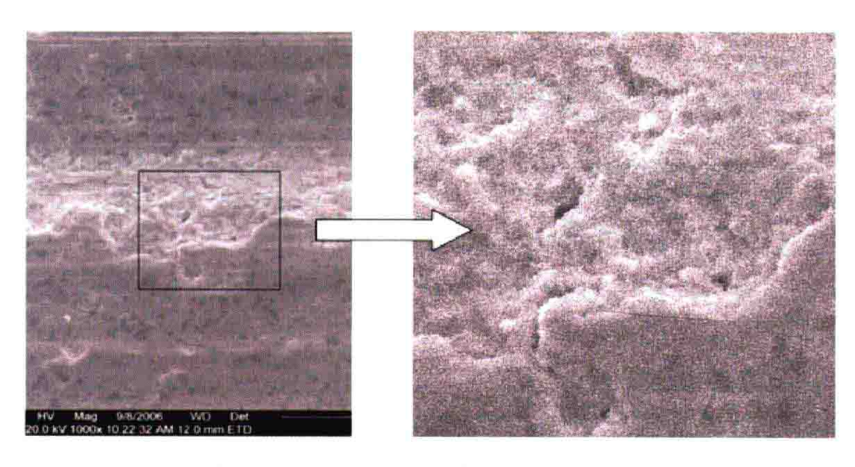


图7－61　微波铁氧体磨削表面微观形貌

微波铁氧体材料的工艺试验表明钎焊工艺提高了金刚石磨粒与基体的结合力。通过对砂轮表面的显微观察，既没有结合剂破碎使磨粒脱落（如图7－62所示），也没有由于磨蚀磨损减弱了结合剂强度而促进了磨粒脱落，由于磨粒间隙大，砂轮没有堵塞，验证了新型单层钎焊金刚石镶块砂轮是成功的，可以完成微波铁氧体材料的磨削加工，而且由于砂轮的自锐性强，在加工中不需要对其进行修整，节省了砂轮的刃磨时间，提高了工作效率。



图7－62　磨削后砂轮微观图

微波铁氧体是典型的难加工材料，普通磨削方法很难实现高效加工。通过研制新型的钎焊金刚石镶块砂轮，在大量工艺试验的基础上探究了高效磨削过程中磨削深度、砂轮转速和工件速度与磨削力之间的相互关系，并进行了磨削表明微观形貌的观察分析。试验结果表明，钎焊金刚石镶块砂轮适用于微波铁氧体的高效磨削加工，在保证较好表面质量的同时，提高了磨削效率。

7.5.4 铁氧体材料固结磨料精密研抛技术

固结磨料研磨抛光工艺简化了微波铁氧体材料传统“精磨－粗抛－精抛”的多步加工，实现高效、绿色加工，拓展了硬脆材料的超精密加工方法和手段，为加工其他硬脆材料提供新理论和新技术。

7.5.4.1 固结磨料研磨抛光技术的产生与发展

研磨抛光（如图7－63所示）在光学、晶体、半导体等加工领域得到广泛应用。研磨抛光过程中，抛光盘的面形会复制到工件表面。随着研磨抛光过程的进行，抛光盘面形因不均匀磨损而恶化。工业生产中，通常采用修整环对抛光盘进行在线或离线修正，达到改善抛光盘与所加工工件面形的目的。

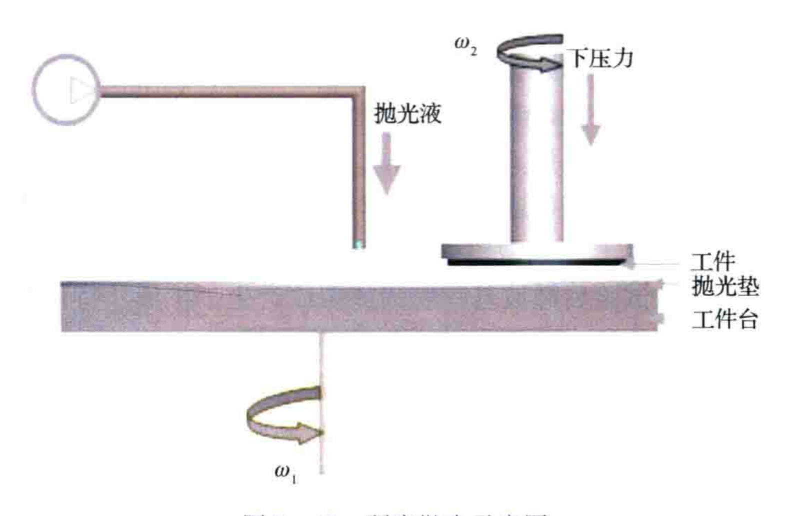


图7－63 研磨抛光示意图

在传统的游离磨料研磨抛光过程中，磨料利用率低，加工效率不高，磨料随机分布，分布密度不均，造成工件研磨切削量不均，工件面形难以控制，固结磨料研磨抛光技术应运而生。与游离磨料抛光技术相比，固结磨料研磨抛光技术最大特点是抛光液中没有游离磨粒，避免了磨料颗粒损伤材料表面，显著地提高了加工效率和表面质量。由于磨料固结在抛光垫上，磨料利用率高；同时，也大大减少后处理工作量与成本，减少抛光废液及清洗过程中大量有害化学物品对环境的污染，是绿色加工技术。基于固结磨料抛光具有以上特点，已被应用于加工多种硬脆材料，如硅片、K9玻璃、手机面板玻璃、硬盘基片、石英晶片等，固结磨料抛光是未来超精密加工发展的趋势之一。

固结磨料抛光垫的制备技术是关键，乔伊（Choi）采用亲水性聚合物制备抛光垫，利用聚合物在水中溶胀导致其强度下降，较易在工件与抛光垫的相对运动中被去除的特性，实现固结磨料抛光垫的自修整，维持其长时间的稳定抛光，用于塑料注射模的抛光加工

时，表面粗糙度达到了纳米级水平，远优于相同磨粒直径的热固性磨具。金（Kim）采用亲水性聚合物与氧化铝磨料制备的自修整抛光垫，其黏弹性能优于传统的聚氨脂抛光垫，可长时间稳定抛光。盖拉蒂（Gagliardi）与罗默（Romer）开展了固结磨料抛光垫抛光浅沟渠隔离（STI）的研究，很好地解决了二氧化硅磨料化学机械抛光时沟渠的凹陷问题。图延（Tuyen）等比较了固结磨料抛光技术与高选择性抛光液抛光 STI 的结果，采用固结磨料抛光 STI 时，抛光速率只对形貌有选择性，选择比高达 100:1。

目前应用的固结磨料抛光垫大都是采用紫外光固化技术制备而成的，由于模具制备等多方面的原因，抛光垫上所含磨料的凸起是均布的，凸起形状通常为圆柱、正四棱柱、正三棱柱等。抛光过程中，工件在抛光垫不同位置的轨迹密度是不同的，造成其磨损不均，从而影响加工工件的表面质量。解决这个问题的方法，就是对抛光垫表面的凸起分布进行优化。朱永伟和李军等开展了亲水性固结磨料研磨抛光垫的研制，实现抛光垫的自修整功能，并对表面凸起图案进行优化，加工硅片、K9 玻璃、手机面板玻璃等硬脆材料，其加工效率或工件的表面质量优于游离磨料抛光。

7.5.4.2 铁氧体材料固结磨料研抛需要解决的关键技术

（1）固结磨料研磨抛光微波铁氧体的材料去除机理

研磨抛光过程中，高质量工件表面的获得与材料去除机理有着非常密切的联系；固结磨料抛光的材料去除机理与游离磨料不同。微波基片是高硬脆材料，化学稳定性高，是加工的惰性材料，抛光过程中是复杂的机械、化学等相互作用的过程，材料的去除方式决定加工效率和加工后的基片表面质量。

通过采用纳米划痕仪研究划痕速度和载荷对微波铁氧体基片表面裂纹的产生、扩展、特征和形貌的影响，结合原子力显微镜（AFM）、扫描电镜（SEM）和 ADE 三维表面轮廓仪测量和观察，与抛光试验后微波基片表面的裂纹产生、扩展、特征和形貌对比，研究固结磨料抛光的机械去除作用。利用 X 射线光电子能谱仪（XPS）分析抛光后微波基片表面的化学成分，结合对抛光后残液的 pH 值及成分的检测，探讨工件表面软化层的形成，分析固结磨料抛光微波基片的化学作用。在此基础上建模计算，分析抛光机主轴转速、抛光压力、偏心距、抛光时间及抛光垫表面图案和结构等参数对抛光材料去除的影响，与抛光的正交试验对比，分析机械与化学的交互作用，探索固结磨料研磨抛光微波铁氧体的材料去除机理。

（2）适合微波铁氧体加工的固结磨料研磨抛光垫设计与制备

通过建模计算不同表面图案（正三棱柱、正六棱柱、正圆柱和正四棱柱等及其分布密度）的抛光垫加工材料去除率，建立表面图案分布与抛光工艺参数（工件的尺寸、偏心距、压力、抛光垫与工件的转速等）之间的关系。基于微波基片加工的材料去除机理和材料特性，分析常用抛光工艺参数范围内，实现微波基片高效、均匀磨削的抛光垫表面图案参数，即突起形状、大小与分布；由于微突起不均匀分布，传统机械加工的方法无法实现。可采用“光绘 + 蚀刻”技术制备紫铜（或不锈钢）模具，再用图形转移技术制备的固结磨料抛光垫。紫铜模具的制备流程常用于群孔（尤其是非圆孔）的制备，其在工艺上是可行的。抛光垫由预聚物、稀释剂、光引发剂、磨料等组分组成。先将前三种组份混合均匀，而后加入磨料再次混合均匀，磨料选择金刚石、氧化铈、二氧化硅、氧化锆等一种或几种；采用图形转移技术通过紫铜模具将上述混合物按设计的图案转移到刚性或弹

性基体上，然后采用紫外光固化方法使其瞬间固化，制成固结磨料抛光垫。根据加工的效率和表面质量各参数的要求，优化抛光垫的结构，如是否有弹性层或刚性层，结构具体是几层（通常是 3 ~ 5 层）等。采用正交试验优化抛光垫的相关组分，如：预聚物、稀释剂和光引发剂等，在加工参数范围内实现抛光垫的自修整功能。此工艺中确保磨料与基体材料间有良好的结合力及其在基体中的均匀分布是本工艺成败的关键所在。

（3）微波铁氧体固结磨料研磨抛光工艺研究及表面质量评价

确定影响微波基片固结磨料抛光表面质量和加工效率的主要工艺参数，采用正交试验设计法综合优化抛光压力、主轴转速、抛光时间、偏心距、抛光液流量等加工过程参数对微波基片的材料去除速率及表面质量的影响；采用相应的试验数据处理方法，研究各个试验参数对加工效率、表面质量及抛光垫性能的影响比例。采用干涉仪测量表面平面度、光学显微镜观察宏观表面质量，采用 SEM、AFM 和 ADE 三维表面轮廓仪等测试和研究微观表面质量，采用差动腐蚀法研究亚表面损伤及残余应力。把相关测量结果作为抛光垫制备和抛光工艺参数优化的评价标准，逐步优化抛光垫的制备参数和抛光加工工艺参数，探索抛光工艺参数与表面质量的内在联系。

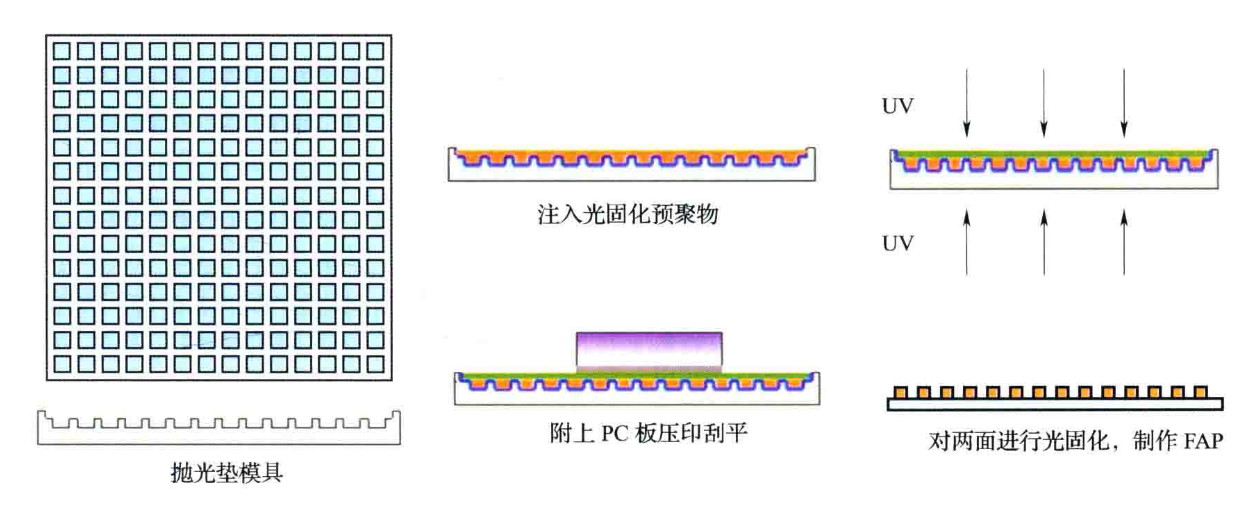


图 7－64　双向固化法制备固结磨料抛光垫的过程示意图

第 8 章　精密光学扫描坐标测量技术

坐标测量机（Coordinate Measuring Machine，CMM）作为一种典型的高精度测量仪器和设备，已经广泛用于航空航天、机械制造、汽车等领域。它可以进行零件和部件的尺寸、形状和位置精度的检测。由于它通用性强、测量范围广、精度和效率高，并能与数控加工系统组成柔性制造系统，近 30 年以来，三坐标测量机技术得到长足发展，成为一类大型精密测量仪器，有“测量中心”之称。

航空航天、汽车、造船和模具工业对产品性能、外形等方面的要求越来越高，使得空间复杂曲面零件在现代工业中得到了越来越广泛的应用，典型应用包括飞机发动机叶片、螺旋桨、涡轮、飞机蒙皮、汽车车身模具、注塑模具、复杂刀具、复杂螺旋曲面等。能否对复杂曲面零件进行高效率、高精度的检测，直接关系到产品的质量和使用寿命。例如飞机发动机涡轮叶片、压缩机的叶片均为复杂曲面，其轮廓度误差大小将直接影响流经其的流体场分布，从而影响其本身的动力性能。因此，研究开发适应复杂曲面零件，能进行高效率、高精度测量的坐标测量机具有重要的理论意义和应用前景。

为了使坐标测量机能够完成复杂曲面的高效率、高精度测量，就需要在传统三坐标测量机的基础上，增加辅助工件转位的回转工作平台，同时使用光学测头替代触发式测头进行扫描测量。这就需要突破光学测头扫描精度低等技术难题，同时实现多测头角度、多转台角度下的测量，从而达到微米级的测量精度。

8.1　坐标测量技术的发展

8.1.1　我国坐标测量技术的发展历史及现状

在现代制造领域，精密测量测试技术是制造技术的重要组成部分，甚至是制造技术中的关键或瓶颈环节。现代制造系统中，测量测试技术不再局限于制造后零件的质量检测，更体现在加工过程中的在线监控、装配中的测量和系统综合测试等方面。

用于几何尺寸和公差测量的三坐标测量机目前已经达到很高的水平并被广泛应用，在现代数控加工装备的普及应用中，坐标测量技术和装备已成为精密测量测试技术和数字化制造技术中的重要组成部分。

我国坐标测量机产业从 20 世纪 70 年代中期开始逐步发展起来，经过多年来的不断开拓、调整、重组，目前已具有了一定基础和产品规模，但与此同时，也面临着新的机遇与挑战。

我国精密坐标检测装备的研制工作始于 20 世纪 70 年代代年，当时主要有北京航空精密机械研究所、上海机床厂、北京机床研究所和天津大学等单位从事相关技术研究。由于该类技术产品涉及到光、机、电、计算机软件等高新技术，所以在研制过程中遇到了很大的

困难。其中，北京航空精密机械研究所专业技术配套，于1978年成功研制出我国第一台三坐标检测机床，并获国防科工委重大成果一等奖。当时三坐标检测装备主要在军工企业中应用，对诸多的其他企业来讲是可望而不可及的产品。

自1982年以后的10年间，国内企业分别从意大利、德国、美国等国家相继引进了先进的坐标测量设备生产制造技术，到1990年初，基本形成了以北京航空精密机械研究所、青岛前哨和上海机床厂为代表的三个生产基地，年产量约60台。在这期间由于我国机械行业把主要精力放在加工设备的更新换代上，对计量设备的重视相对较弱，因此国外检测装备产品逐步进入中国市场。

经过20世纪末近20年的科技攻关和技术引进，为国内坐标检测装备的产业化奠定了基础。同时，随着我国制造领域数控设备数量的猛增，我国坐标检测装备的市场需求空前高涨，国内的研制厂家数量和产品效益达到了高峰。各生产厂家在技术进步和市场需求的双重驱动下，加快了国产坐标检测装备产业化的进程。我国经济的高速发展也引起了国外厂商的高度重视，纷纷入驻中国市场，坐标测量设备厂家数量也从20世纪80年代中期的三四家猛增到20多家。到目前为止我国的坐标检测装备生产厂家和产品数量已经形成一定规模，产品种类也形成系列化，但多以生产型为主，其产品测量不确定度约为（$3 + L/300$）μm（其中，L为测量长度，单位：mm）左右，高端产品大多仍被国外厂商垄断。同时更重要的是由于包括测量软件、控制系统以及测头等在内的核心技术和部件仍需从国外引进，这极大地限制了国内坐标测量设备的发展。

我国坐标测量装备的发展具有很好的前景和巨大的市场潜力，三坐标测量机产业在我国发展了30余年，从最初的年市场销售10余台、产值千万元，到目前年销售数千台、产值数10亿元。30年前，我国测量机市场份额的百分之八十被国外企业占领。20世纪90年代，随着我国测量机技术水平与国外差距有所减小，民族测量机产业曾经占领了国内市场的半壁江山。但是近年来，随着国外坐标测量机技术的进步和采取跨国集团化经营，国内测量机的市场份额正在缩小，因此我国坐标测量机产业迫切需要创新技术支持与推动。

目前国内精密测量技术落后于制造技术，特别是武器装备制造技术的发展对精密测量技术提出了更高的需求，主要体现在以下几方面：

①复杂结构复杂形状零件精度的检测、加工过程中的在线检测以及超大型和微小复杂零件的精密检测等方面缺乏有效测量手段和核心技术，严重依赖进口；

②目前精密坐标测量的核心技术仍然被国外垄断，而国防装备制造需要自主知识产权的测量测试技术与产品的支撑，国防安全需要高档精密坐标测试技术的完全国产化；

③国内坐标测量测试技术研究分散、薄弱，具有竞争力的核心技术产品极少，不能形成代表国家水平的坐标测量测试技术，无法满足装备制造的精密测量需求。

近年光学扫描精密坐标测量正在兴起，随着光学扫描测量精度的提升，这种测量技术未来会占有越来越多的市场份额。提高测量效率和测量精度是坐标测量机发展永无止尽的主题，许多新技术也是围绕这一中心开发出来的。在发展非接触光学扫描测量的同时，不同类型的测头同时使用或交替使用，是一个重要发展方向，是当前我国测量机技术发展的前沿。

8.1.2 传统三坐标测量机的局限性

在解决复杂曲面的快速精密测量问题时，传统接触坐标测量机有局限性。测头是三坐标测量机的核心部件，作为前端传感器来提供被测物体的几何信息，其发展水平将直接影响坐标测量机的测量精度和可靠性，测头的性能是限制坐标测量机测量精度和速度的主要因素，坐标测量机能否适应现代化高速度、高精度的测量要求，必须依赖于精密测头的不断创新与发展，研究精密测头，为坐标测量机提供全新的触测原理，进一步提高测量精度和测量效率，才能使坐标测量机发生根本性变革。

测头分为接触式测头与非接触式测头两种，前者主要包括机械式测头、触发式测头和扫描式测头三种；后者则集中表现为光学测头。传统三坐标测量机配备最多的是触发式测头，其测量原理是：当测头测端与被测物表面接触时，CMM 发出采样脉冲信号，并通过仪器的定位系统锁存此时测端球心的坐标值，以此来确定测端与被测表面上接触点的坐标值。该类测头具有结构简单、使用方便、制作成本低及触发精度高等优点。但该类测头的缺点也十分明显，其测量速度慢，这一方面是由于触发式测头的采点方式是离散的，测头在一次采点完成后需退回一段距离，让测针归位后才能进行第二次采点；而且采点时接触物体表面的速度不能太快，若测针接触物体速度过快使得测针的位置偏离过大，则会被认为是发生了碰撞而导致采点失败；另一方面，若被测物体具有比较复杂的几何形状，那么测针需要变换若干次指向才能完成整个测量，并且测针的每个指向都需进行校准。此外，它还存在各向异性（三角效应）、预行程等误差，限制了其测量精度的进一步提高，最高精度只能达到零点几微米。

扫描式测头也称量化测头，是一种精度高、功能强、适应性广的测头，同时具备空间坐标点的位置探测和曲线曲面的扫描测量的功能。其测量原理是：测头测端在接触被测工件后，连续测得接触位移，测头的转换装置输出与测杆的微小偏移成正比的信号，该信号和精密量仪的相应坐标值叠加便可得到被测工件上点的精确坐标。然而，此类测头结构复杂，制造成本高，目前世界上只有极少数公司可以生产。

由于接触式测头均采用接触式探针与被测工件接触采集若干个离散点，由这些测点的3维坐标来确定被测工件表面的位置或尺寸大小，可能会存在较大误差。接触式测量所用的测针尖端一般为红宝石球，测头采点所得的空间坐标为红宝石球的球心位置。而测针与物体表面的实际接触位置并非球心，所以物点的坐标必须根据红宝石球的半径进行补偿，这就导致了红宝石球的半径补偿误差的问题。同时，由于接触式探针有一定的大小，在对内尺寸较小的孔、槽等工件进行测量时，常会出现红宝石球的半径补偿方向错误的问题。此外，测头测端与被测工件接触时产生的压力会引起被测工件的变形和划伤，也难以对一些薄片、刀口轮廓及柔软的材料进行测量。图 8－1 为红宝石球测量产生误差的示意图。

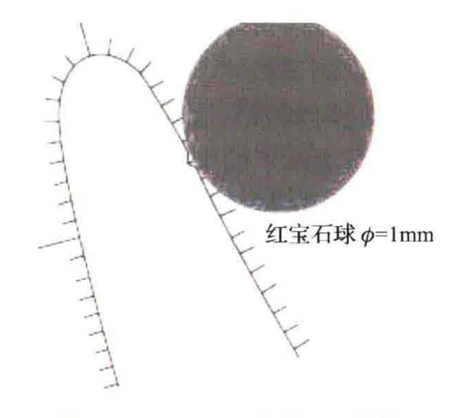
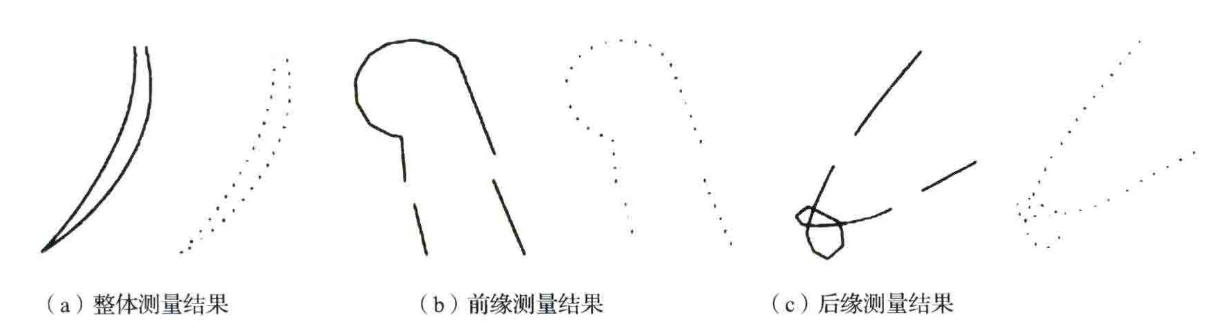


图 8－1　红宝石球测量示意图

在测量叶片截面型线时，普遍的做法是将 CAD 模型沿竖直方向做等高切割，得到被测截面的名义轮廓，并在名义轮廓上根据曲线特征构造出疏密不同的测量

点。例如叶片的前后缘变化相当大，为了避免在测量中损失这部分的几何特征，需要在这两部分增加测点密度。

如图 8－2 所示为航空发动机叶片一组截面型线的测量结果，其中图 8－2（a）为截面型线的整体测量结果，可以看出，在曲率变化不大的叶盆和叶背部分测量结果相当不错，测点的排序整齐无错乱。图 8－2（b）和图 8－2（c）为叶片前后缘的测量结果放大图，图中显示了这部分测点分布错乱的情形。造成这种现象的原因为，相对于叶片前缘和后缘微小的几何尺寸，叶片截面型线轮廓的实际值与名义值之间的偏差较大，使得实际测点落在了工件以外较远处，造成测针无法如预期般采点，这样就会出现补偿错误，造成获得的几何特征与实际不符，如图 8－2（b）中形成棒槌状，或如图 8－2（c）中出现交错。



（a）整体测量结果　（b）前缘测量结果　（c）后缘测量结果

图 8－2　叶片截面轮廓测量

随着技术的发展，三坐标测量机需要满足各种类型的零件的测量任务要求。然而对于回转对称类零件来说，传统三坐标测量机没有加装回转工作台，使得在对此类零件的测量过程中，需要测量机带着测头在较大范围内进行测量，降低了测量的精度和测量效率。因此加装回转工作台也就成为坐标测量机的发展方向。

8.1.3　光学扫描坐标测量机的特点

目前，国际领先的叶片类复杂曲面零件测量采用光学测头传感器，配合高精度转台和多轴联动的坐标测量机，实现高精度高效率连续扫描测量。该技术是传统三坐标测量技术向非接触光学扫描坐标测量的发展，对发动机叶片的测量具有突破性意义。光学扫描非接触测量目前主要应用于发动机叶片的测量，在航空航天、汽车、电力设备制造等领域也具有广泛的应用前景。高速光学扫描坐标测量机具有以下特点。

①速度快：光学扫描坐标测量机采用光学非接触测头取代了传统的接触触发测头，测量采点速度非常快，采点速度达到数千点/min 以上；测头的定位由高精度旋转头来控制，测量采点过程中，旋转头和直线轴进行联动，在运动过程中完成测量采样，不需要像接触触发测量时频繁的运动启动、停止和回退。完成一个中等大小叶片的测量通常只需数分钟，而传统接触式测量需要数十分钟。

②不需要测尖半径补偿：光学测头直接以光点对物体表面进行采点，不存在测头半径补偿问题，避免了因测尖补偿方向错误而造成的测量失真。

③能够测量微小零件特征；光学测头分辨率高，并且测量光点直径可小至数微米至数十微米，能够测量非常微小的几何特征，例如叶片进排气边等。

④光学测头为非接触测量，并且通常具有比较大的工作距离，具有天然的防碰撞能

力。

⑤效率高，适合于批量检测。

⑥没有测量力，可测量软质易变性和不允许接触的工件。

三坐标测量机可以完成大多数几何形状的测量任务，但对自由曲面等特殊零件，多轴（四轴或四轴以上）测量系统具有明显优势。多轴测量系统不仅测量范围更广，测量精度更高，测量速度更快，并且结合光学扫描测头可完成叶片等复杂曲面和微小零件特征的测量任务。将三个直线轴的三坐标测量机和一个或多个旋转轴结合，形成多轴测量系统，可以将测量机的测量效率进一步提高，对测量回转体类零件更为有利。

接触触发测头有时被称为“万向测头”，即可以进行空间各个方向的触发测量。而对光学测头而言，通常有所谓的“角度特性”，即对入射光线方向与工件表面法线方向夹角有一定要求，夹角过大时无法测量。特别是，当测量运动过程中此夹角变动量比较大时，将影响测量精度。所以对复杂曲面的光学扫描测量，需要采用多轴（四轴或四轴以上）运动才能控制夹角变动量，满足测量精度的需求。多轴扫描坐标测量机是三坐标测量机技术的发展趋势之一。

8.1.4 国内外光学坐标测量技术概况

8.1.4.1 国外光学坐标测量设备主要厂家

随着坐标测量机在现代化工业制造领域的广泛应用，光学测头由于其测量速度快、测量精度高、方便灵活等显著优势，引起了业界的高度关注，使得光学测头的研制在世界范围内成为精密量仪制造厂家的研究重点。

目前，国外著名的检测装备生产厂家主要有海克斯康（Hexagon）公司、德国的蔡司（Zeiss）和温泽（Wenzel）公司、意大利的 Coord3 公司、英国的 IMS 公司、美国的 OGP 公司、日本三丰（Mitutoyo）公司等。近年，英国 IMS 公司推出了一种低成本的手动式检测装备 IMP，可进行接触和非接触测量。在设计上，这种检测装备采用了低重心及升降 *Y* 轴的铝材“半桥式”结构。同传统的检测装备相比，这种结构减轻了运动质量，提高了测量效率。而德国 Zeiss 公司开发出的 Eclipse 550 小型 CNC 检测装备，是专门为车间测量而设计的，其测量范围为 508mm × 508mm × 508mm，测量不确定度为 5.6μm，最大测量速度为 432mm/s。由于采用了热不灵敏的陶瓷技术，使得测量机的测量精度在 17.8 ~ 25.6℃的范围内基本可不受温度影响。Hexagon 旗下公司所开发的扫描检测装备——Chameleon CMM，能以非常快的速度在单点和多点数据采集模式间进行转换。此外，该检测装备所配备的 Quindos 软件，可提供包括齿轮、板材、凸轮及凸轮轴测量模块在内的 50 多种应用测量模块。另外，在超精测量和定位技术方面，德国 SIOS 公司开发了一种纳米定位与纳米测量机（Nano Positioning and Nano Measuring Machine，NMM）。该系统采用激光干涉仪进行位置测量，测量范围为 25mm × 25mm × 5mm，分辨率为 0.1nm，驱动方式采用电磁驱动，使用的测头可以由用户选定，如扫描隧道显微镜（Scanning Tunneling Microscope，STM）探头、原子力显微镜（Atomic Force Microscope，AFM）探头、自聚焦光学探头、电容探头或电感探头等。

在 2010 年，德国的 Wenzel 公司率先推出了首款航空发动机叶片多轴高速白光检测装备 MAXOS/CORE，其采用白光点光源测头，取代了传统检测装备的接触式测头，从根本

上解决了接触式测头在叶片测量中面临的难题。同时，Hexagon 公司近年来也展开了非接触式三维光学测量技术的研究，并于 2011 年推出了相应的产品，即 Cognitens WLS400。而美国的 OGP 公司新近推出了一种根据多传感测量技术而专门设计的新型多传感测头检测装备；其传感系统集成了多种常用的传感测头，包括远心变焦镜头光学测头、视频测头、触发测头、接触扫描测头、同轴激光测头、离轴三角测量法激光测头，此外还配备了微探针测头、低接触力测头和白光测头等。加工车间使用这种多功能检测装备，通过一次安装即可完成被加工零件的大部分测量工作，不仅可以大大节省测量工时，而且避免了购买和使用多台不同类型检测装备的麻烦。

（1） Wenzel 公司

2010 年 5 月，德国的 Wenzel 公司推出了首款航空发动机叶片多轴高速白光测量机 MAXOS/CORE，如图 8 - 3 所示，其采用白光点光源测头，取代了传统三坐标测量机的接触式测头，从根本上解决了接触式测头在叶片测量中面临的难题。



（a）MAXOS 系统　　（b）CORE-DS 系统

图 8 - 3　Wenzel 公司的多轴高速白光测量机

MAXOS/CORE 系统在叶片测量方面具有明显优势，该机具有如下特点：

首先，MAXOS/CORE 的测量速度非常快，其白光测头的采点速度可以达到 4200 点/min，且测头的定位由高精度旋转头来控制，同时叶片装夹于高精度转台上，与旋转头和直线轴进行联动，因此完成一个中等尺寸叶片（高度约为 400mm）的 3 个截面型线的测量只需 1min；

其次，白光测头直接以光点对工件表面进行采点，不存在测头半径补偿问题，从而避免了因测头补偿方向错误而造成的测量失真；

第三，MAXOS/CORE 的光点直径可小至 9μm，能够测量到叶片表面非常微小的几何特征，最大限度地降低了叶片实测表面的失真度；

第四，MAXOS/CORE 有效规避了激光测头具有的散斑效应以及反射光信号强度等问题，适用于任何表面的叶片测量，而无须喷涂。

目前使用 Wenzel 公司 MAXOS/CORE 系统的客户主要包括 Alstom、Siemens、Toshiba - GE 等大型透平机叶片制造企业。最近 Wenzel 又与 Delta 航空合作，应用 MAXOS 系统对 Delta 航空的飞机发动机叶片进行维护检测工作，以期获得更高的检测效率和满意度。

（2）Hexagon 公司

Hexagon 公司是全球最大的三坐标测量机生产企业，近年来开始非接触式三维光学测量技术的研究，并于 2011 年 4 月推出了相应的产品，即 Cognitens WLS400，如图 8－4 所示。






（a）Cognitens WLS400 测量系统　　（b）Cognitens WLS400系统的应用

图 8－4　Hexagon 公司的白光测量系统

Cognitens WLS400 白光测量系统拥有高分辨率数码摄像机（3×4.0M 像素工业级数码相机），基于 LED 的照明技术，采用的碳纤维外壳具有良好的刚性与热稳定性，具有快速数据采集与处理的功能。其基本原理是：Cognitens WLS40 在工件表面上投影一个不规则图案，三个相机同时捕获该区域图像，并通过特有的算法重构出三维点云数据，结合传感器技术和 CoreView 软件系统可以生成标准的三维检测报告。该系统的显著优势集中体现为：单次拍摄覆盖面积大，快速非接触式数据采集，多功能手动及自动化应用，车间条件下高精度、可靠运行，收集丰富而全面的三维信息。

Cognitens WLS400 主要包含两种机型：Cognitens WLS400M，即手动版白光测量系统，它用于三维测量、质量检验和数字化工程；Cognitens WLS400A，即自动版白光测量系统，是一个面向车间现场的高效、柔性、自动测量解决方案，该系统的缺点是测量精度比较低。

（3）OGP 公司

美国的 OGP 公司新推出了一种根据多传感测量技术而专门设计的新型多传感测头坐标测量机（如图 8－5 所示）。该坐标测量机的传感系统集成了多种常用的传感测头，包括远心变焦镜头光学测头、视频测头、触发测头、接触扫描测头、同轴激光测头、离轴三角测量法激光测头，此外还配备了微探针测头、低接触力测头和白光测头等。加工车间使用这种多功能坐标测量机，通过一次安装即可完成被加工零件的大部分测量工作，不仅可以大大节省测量工时，而且避免了购买和使用多台不同类型测量机的麻烦。由于测量软件集成了处理多种传感器数据的模块，因此可快速、简便的对各种复杂形状工件进行完整、详尽的测量分析。为提高测量机 X、Y 轴的测量精度，对该测量机的结构布局进行了精心安排，如 X、Y 轴采用带液体冷却的直线电机驱动等新技术，可配置双旋转轴（W_1 和 W_2）以实现五轴测量，这对于复杂三维型面（如发动机的涡轮叶片）的测

量尤其适用。

（4） Breuckmann 公司

StereoSCAN^{3d}是德国的 Breuckmann 公司推出的一款三维白光测量系统，如图 8－6 所示，其采用了特有的专利技术“微结构光投影技术”和非对称结构。该系统体积小、分辨率高、测量精度高、可靠性高、操作简单灵活，具有较高的性价比。

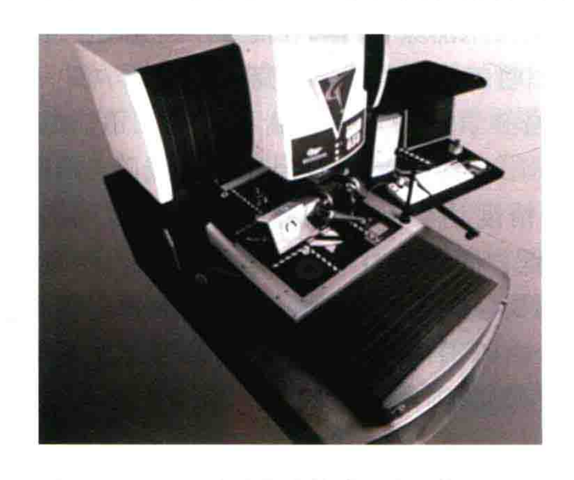


图 8－5　OGP 公司的多传感测头坐标测量机

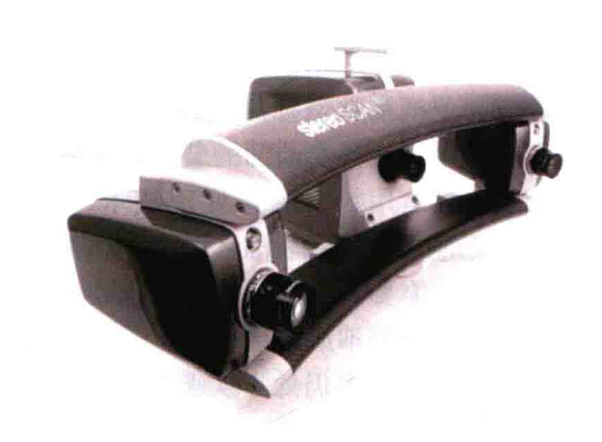


图 8－6　Breuckmann 公司的三维白光测量系统

stereoSCAN^{3d}系统主要由两个高分辨率数码相机和一个 MPT 投影单元组成。在灵活性方面，两个数码相机的非对称安装结构同时实现了 10°、20°和 30°的测量角度，使得不易被扫描到的物体部分也可以被测量到。通过转换镜头可以改变测量范围，数码相机的位置也可以很容易改变，这样就可以实现较小的测量范围，而不必改变系统的基架。在准确度方面，两个兆级分辨率的数码相机保证了高分辨率和准确度。用碳纤维制成的传感器基架保证了系统的机械稳定性和热学稳定性。快速的摄像时间大大减少了环境变化对测量的影响，快速的系统校准保证了最高的测量准确性。

StereoSCAN^{3d}系统可广泛应用于各种工业技术类领域，例如汽车大型钣金件的表面形状检测，飞机螺旋桨叶片的三维数字化，以及各部件的精密测量和形变分析，并可以在车间现场测量高温反光的大型模具。其典型用户有奔驰、宝马、波音和 NOKIA 等。

（5） 其他光学测量产品

Surface Measure Series 是日本三丰精密仪器推出的针对不同环境和材质要求的线扫描三角法非接触三坐标测量机。其使用三丰制非接触式线性激光测头，扫描宽度 60mm，扫描深度 60～100mm，工作距离 93～115mm。

WIZblade 是以色列 NexTec 公司推出的航空发动机叶片测量解决方案。使用的 WIZprobe 点激光扫描测头单点精度达到 12μm（2σ），单点重复精度 0.6μm（2σ），工作距离 45～55mm。

日本尼康公司使用 XC 系列三线激光扫描测头，测头同时发出三条激光线，将线激光的测量效率提高了 3 倍。

整体来说，光学测量机的测量效率随其测量精度的降低而提高。线激光三角法测头在测量机上的应用精度，仍然较低，不能够满足测量精度 0.03mm 的叶片的测量要求。

8.1.4.2　国内光学扫描坐标测量技术的研究

近年来，光学测头凭借其非接触、高精度等优点，已经广泛应用于工业制造领域，并

逐步引起了国内一些科研院所的关注，然而国内对于光学测头的研究起步较晚，高精度光学扫描测头的研究在国内尚没有相关报道。

1998 年，西安交通大学的机械制造系统工程国家重点实验室尝试在传统三坐标测量机上，在保留接触式测头的同时，增加双目视觉予以辅助，从而实现准确测量；2004 年，天津大学针对金属强反射表面测量，基于激光三角法原理，将坐标测量机与主动式双目视觉相结合，通过投射线性激光束，并利用光学偏振技术消除了金属表面强反射光对测量的干扰，使得光学测头精度达到 0.05mm；2006 年，哈尔滨工业大学研究了基于光学测头特征点成像的单机视觉坐标测量系统；此外，中国科学技术大学研制了激光三角法的激光等距非接触测量车身曲面的装置，测量系统采用半导体激光器为光源，线阵 CCD 为光电接收器，运用数字图像处理技术，使系统精度达到较高的程度。但当时国内的 CCD 非接触测量设备的曲面测量系统的精度较低，一般在 0.05mm 这一量级，不能满足精密测量的需要。青岛海洋大学也在点激光测头应用于三坐标测量机方面做过研究，但目前为止技术仍不成熟。基于上述分析可知，由于国内对于该方面的研究相对有限，大部分的研究和探索仍处于实验室阶段，未见相关的国产产品问世，这与国外先进水平尚存在较大差距。

非接触测量设备的系统精度是由多方面因素决定的。光学测头已具有较高精度，可达到几个微米，但光学测头的搭载平台精度较低，一般为十几个微米，造成系统整体精度较低；因此，研制高精度的搭载平台是提高非接触测量设备系统精度的重要环节。目前的搭载平台有：标准三坐标式、关节臂式、并联机构式、悬臂式等，应从中优选出适合检测条件的、高精度的检测平台。

坐标测量机主要向着精度更高、尺寸更小、互换性更好、综合功能更强、数字化的方向发展，这就使得光学测头将得到越来越广泛的应用。尤其是近年来，飞机发动机叶片的加工与检测一直是困扰航空制造领域的技术难题，为解决这一难题，通过研制坐标测量机白光非接触式测量系统，来解决目前航空发动机制造业中叶片测量效率低的关键问题，同时也有助于提升国内机械加工零部件的检测水平，提高检测效率，因此这项技术具有广阔的应用前景。

8.2 光学扫描坐标测量技术研究及应用

8.2.1 光学坐标测量的关键技术

测量测试技术在制造行业的地位越来越重要，制造过程中的任何一个环节都离不开测量技术的支撑。目前国内测量测试技术落后于高端制造技术的发展需要；随着国家专项“高档数控制造技术”的推动，高档机床数控系统、功能部件和数控机床装备已经取得显著进步，但配套的检测技术仍然与国外差距很大，国内检测技术仍被认为是“低端”状态，测量测试关键技术被国外公司把持，国产化率较低。

现代制造业已呈现出和传统制造不同的理念与技术，测量技术从传统的“事后”测量，进入制造现场，参与到制造过程。在线测量技术的应用需求尤为迫切。在航空制造领域，复杂曲面零件（航空叶片、整体叶盘等）、大型（飞机蒙皮、机匣等）和微小零件

(喷油嘴等) 的快速精密测量具有迫切的应用需求。

随着科学技术的不断进步和适应现代化生产的需要，检测装备不断向高精度、高效率、多功能和低成本的方向发展，其各组成部分也都在传统技术的基础上不断发展。光学扫描坐标测量技术的研究方向主要包括：

(1) 光学扫描坐标测量理论与方法

包括建立光学坐标测量理论方法、测量模型、误差分析和测量新原理新方法等。

(2) 测量传感器 (测头) 开发与特性研究

研究开发适用于坐标测量机上的光学扫描测头，研究基于位移传感原理的高精度光学扫描测头，包括光学扫描测头、测头连接和转位机构、测头控制器以及与坐标测量机的同步采样、传输、存储等技术。

在坐标测量机中目前广泛采用的依然是接触测头，触发式测头的市场基本被英国雷尼绍 (Renishaw) 公司垄断。传统的接触测头在模拟测头方面，瑞士的西普公司、德国的蔡司公司和莱卡公司研制了三向电感测头，可以达到很高的测量精度。而在最新的触发测头中，由于采用了固态传感器技术，大大减小了测量误差，特别减小了在使用较长测杆时由于预行程变差所引起的误差。

非接触扫描测头的生产厂商较多，例如德国的米铱公司和日本基恩士公司生产的三角法激光位移传感器和共轴激光位移传感器等。以色列 Optimet 公司基于锥光全息法开发的传感器测头特别适于复杂型面的测量，在不影响精度的前提下，锥光偏振全息测头可以测量更大的角度范围，并对同轴性的要求大为降低。

德国 Wenzel 公司所开发的白光点光源测头的采点速度极高，可达到 4200 点/min；其光点直径可小至 9μm，能够测量到包括叶片进排气边等非常微小的几何特征，最大限度地降低了实测表面的失真度，并且有效规避了激光测头具有的散斑效应以及反射光信号强度等问题，适用于任何表面的叶片测量，而且无须在叶片表面喷涂其他材料。

(3) 坐标测量机械结构研究

测量精度与效率是衡量检测装备性能优劣的两项主要指标。传统的概念是为了保证测量精度，测量速度不宜过高。而随着生产节奏不断加快，要求检测装备在保证测量精度的同时，对测量速度提出越来越高的要求。

提高检测装备的测量速度，要求几个方面的改进：首先，对检测装备的结构设计进行优化，其目的是提高刚性，减轻运动部件的质量；其次，使用轻质材料以降低运动惯性，用重量轻、刚性好、导热性强的合金材料来制造检测装备的运动机构构件，如铝合金、陶瓷材料以及各种合成材料得到了越来越广泛的应用；再次，由于新型材料良好的导热性，在温度分布不均匀时，也能在极短的时间内迅速达到热平稳，将由温度变化所产生的热变形减至最低。

(4) 坐标测量控制系统

在现代制造系统中，测量不能仅仅局限于成品的验收检验，而日益向整个制造系统提供有关制造过程的信息，为控制提供依据。从这一要求出发，必须要求检测装备具有开放式的控制系统，具有更大的柔性。而国产检测装备的控制系统大多属于廉价型控制系统。在高档型的控制系统中，Hexagon 集团下属 DEA 公司的 MASTER 系统可以说是比较先进的。但是，无论哪一种控制系统，都存在一定的故障率。从这个角度讲，控制系统的发展

趋势是设计出具有故障自诊断和恢复功能，并具有冗余保护，在发生局部故障后仍能运行。

（5）测量软件技术开发

研究国产坐标测量机软件，支持多轴测量和多种测头的数据采集，支持复杂零件的测量编程和数据评价。

检测装备的功能主要由软件决定，其操作、使用的方便性，也首先取决于软件，检测装备每一项新技术的发展，都必须有相应的软件技术与之匹配。为了将检测装备纳入生产线，需要发展具有网络通信、建模、反向工程功能模块的软件；同时完善应用于不同类型工件的专用测量软件的开发和使用，最终形成基于同一种平台开发的测量软件族，这已成为软件革新的一种必然趋势。可以说测量软件是检测装备中发展最为迅速的方面，软件的发展将使其向全能化和智能化的方向迈进。

目前市场主流的测量软件主要有 Hexagon 公司的 PC－DMIS 系统、莱卡公司的 Quindos 系统等。日本的三丰（Mitutoyo）公司还研制了一种图形及绘图程序 Autoplot，用于辅助操作者进行实测值与要求测量值之间的比较。

（6）生产线全流程的数字化检测

随着飞机数字化设计与制造技术的发展，大型整体结构件用量的不断增加，以及民用飞机经济型与安全性要求的日益提高，对产品的制造精度也提出了更高的要求，使产品检测难度日趋增加，从而对测量技术提出了新的需求，传统的测量技术已难以满足飞机零部件快速、高效、高精度检测要求。当前基于三维模型的数字化检测技术应用已成为打通飞机复杂零件与大尺寸零部件数字化设计、制造、检测一体化流程，提升检测效率与水平的关键环节。

在数字化检测方面，国内飞机制造企业在飞机研制生产中也较多地应用了三坐标测量机、激光跟踪仪等测量设备和测量技术，在产品质量控制方面发挥了重要作用。但是目前对于钣金零件、复合材料等非金属零件以及飞机部件的外形检查，仍在大量使用样板、模胎、专用检验工装及量规、塞尺等检验方法进行检测。这种检测结果是基于模拟量的合格与不合格，难以精确地描述零部件状态，更无法将实物的真实状态反映到产品模型上形成设计－制造－检测的闭环控制，造成零件精度较低，影响飞机装配质量，难以满足飞机的气动外形要求。

近年来国外基于模型定义（MBD）技术在波音 787 机型上的成功应用使得设计制造一体化技术得到大发展，于此同时，以坐标测量机、激光跟踪仪、激光扫描仪等为代表的数字化检测技术正在取代传统测量技术，在飞机机身复杂零部件以及大尺寸零部件检测中得到越来越普遍的应用，并成为飞机数字化制造中的关键支撑技术之一，在提高飞机制造和装配质量和效率方面发挥了重要作用。波音、空客、洛克希德－马丁、罗罗、梅西埃－道梯、福特等公司已经普遍采用基于数字化测量设备的产品三维检测与质量控制手段，建立了较为完整的数字化检测技术体系，开发并部署了相应的计算机辅助三维检测规划与测量数据分析系统，制定了相应的三维检测技术规范，显著提高了检测效率与质量。同时国外航空制造部门也越来越多地以便捷高效的制造现场数字化检测技术为支撑，发展新的、高效率的制造流程和工艺（如通过现场检测定位减少或简化装配工装等），并应用于飞机产品质量控制、加工现场的制造数据反馈与

自适应补偿、柔性自动化装配定位等，直接推动了相关技术和工艺水平的大幅提升，极大地提高了制造质量和生产效率。

（7）光学坐标测量测试专用装备技术研究

研究高精度光学坐标测量测试装备核心技术，包括：高刚度轻量化技术、精密导轨元部件设计与制造技术、多轴联动驱动与控制技术、测头校准标定技术等。研究超大、超小、特种复杂等零部件专用测量测试技术方法和工艺装备开发等。

8.2.2　坐标测量中测头传感器的发展

测头虽小，却是测量机的核心部件。测头作为前端传感器提供被测物体的几何信息，是所有三坐标测量机的必不可少的元部件。坐标测量机测头用于拾取触测信号，测头可视为一种传感器，其基本功能是测微（位移）和精度（重复精度）。测量机的功能、效率、精度与测头密切相关。坐标测量机的发展促进了新型测头的研制，而新型测头的出现又使坐标测量机的功能更加完善。

接触式测头与工件表面接触，直接拾取工件表面位置信号，因而受工件表面状态影响小，容易保证精度，价格也较低。光学测头主要包括结构光测头和视觉影像测头；视觉影像测头已经广泛应用于坐标测量机，成为坐标测量机的一个门类；视觉影像测量机在测量二维形貌尺寸方面具有优势，但对三维复杂曲面测量不具优势。

测头的性能和精度水平将直接影响坐标测量机的测量精度和可靠性，测头的性能是限制坐标测量机测量精度和速度的主要因素，坐标测量机能否适应现代化高速度、高精度和多功能的测量要求，必须依赖于精密测头的不断发展完善。

近年，数控加工机床自身配备在机（在线）检测功能越来越普遍，实现在机检测的必备条件之一就是机床配备测头传感器。在机测量是高档数控机床的发展趋势，精密测头的应用领域和市场前景十分广阔。

根据用途不同，有不同种类的测头，目前大量用于三坐标测量机商品化测头主要分类如图 8 –7 所示。

接触式测头与工件表面接触，直接拾取工件表面位置信号，因而受工件表面状态影响小，结构简单，容易保证精度，价格也较低，是目前广泛流行的测头。目前接触触发测头市场被国外几家公司垄断，主要生产商是英国雷尼绍，其产品性能种类全面，性能优异，目前供应近半测量机市场。其他几个著名测量机生产商生产的测量机测头，主要配套自己公司的测量机使用，例如蔡司、三丰、尼康、海克斯康等。

非接触式测头通常采用光学的方法进行测量，凭借其测量速度快、测量效率高、方便灵活且易于实现自动化检测等优点受到国内外普遍关注。由于光学测头利用了光的物理特性来进行测量，而无需接触被测工件，这样就能够完全避免测针补偿带来的潜在问题，且不会损坏被测工件表面。

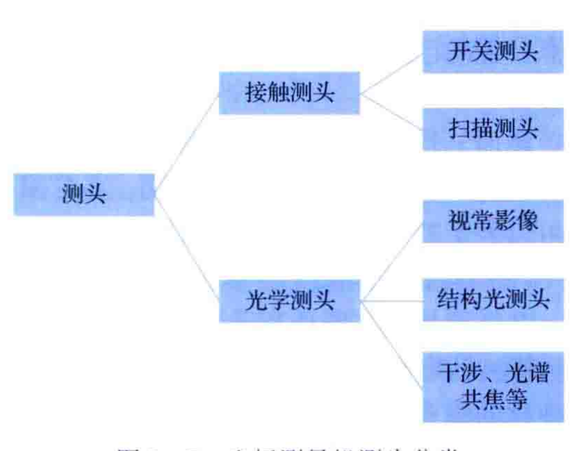


图 8 –7　坐标测量机测头分类

光学测头主要具有以下特点：

①非接触测量没有测量力，可测量柔软和易变形件、脆性和易损件，在某些不允许接触的场合，光学非接触测头更显示其独到的优越性；

②非接触测头可远离被测工件对曲面进行扫描测量，防止测头与被测件碰撞；

③非接触测头可进行扫描快速测量，不像接触测头那样需要探测、退回、移动等逐点测量，从而使测量效率大大提高；

④光斑可做得很小，可探测一般机械测头难以探测的部位，也不必进行测端半径补偿；

⑤不少光学测头具有大的量程，几毫米至几十毫米，这是一般接触测头难以达到的。

光学非接触测头相对于传统的接触式触发测头有许多优点，但其也有不足之处，最主要的是测量精度一般比接触式测量要低。但在一些特殊的场合，例如汽车、飞机发动机等的复杂曲面零件的测量，光学测头的应用具有独特优势。随着光学技术及光学理论的发展，光学扫描测头的精度越来越高，光学测头将在更多的领域取代传统的接触式测头。

目前光学扫描坐标测量设备用非接触测头主要有三角法测头和共轴法测头。

(1) 三角法测头

在非接触式三维面形测量领域，三角法是使用时间最久、应用最普遍的一种方法，它利用光源、被测点和光电检测器之间的三角关系推算出空间被测点的三维信息。具体来说，就是利用光源、像点和物点之间的三角关系来求得物点的距离。在实际应用中，常用激光或 LED 作为光源，电荷耦合器件（Charge Coupled Device，CCD）摄像机作为检测器，将激光光束以一定角度投射到物体表面，在另一方向用摄像机接收散射光。其测量原理如图 8-8 所示，光源向物体发射一个光点，光点到达物体后经反射，可在视觉传感器上采集到一个像点，此时，光源、物点和像点就形成了一个稳固的三角关系，其中光源和视觉传感器上的像点位置均已知，由此就可以计算出被测物点的三维坐标值。

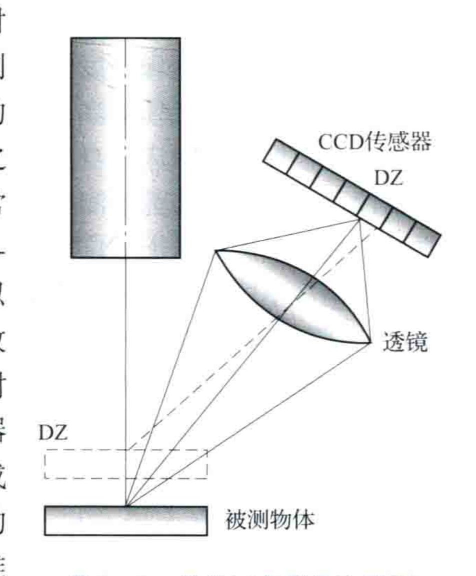


图 8-8　光学三角测量法原理

然而三角法测头精度不如接触式测头，影响其推广应用。近年来，随着技术的发展，三角法测头的精度飞速提升。目前，各厂家的三角法测头的标称精度已经达到微米级，已经可以满足叶片类零件的测量精度要求。

(2) 共轴法测头

共轴测量法主要涉及干涉法和共焦法两种。

干涉法利用光的干涉原理对物体进行测量，通过向被测物体表面投射空间或时间上周期变化的模式光产生干涉条纹，条纹中所包含的光学相位信息反映了被测物体表面的几何形状。其具体实现方式为：一束光通过平面分光镜（即半透半反镜）后被分成两束，一

束经由镜面反射至参考平面处，而另一束则透射至被测工件表面，这两束光经叠加后产生干涉条纹，该干涉条纹的形式主要取决于被测工件的深度信息及其表面的几何特征。随着激光技术的发展，出现了双光束干涉、多光束干涉、外差干涉等多种方法。干涉法可以达到较高的精度，但其测量范围通常很小，并且测量系统的稳定性会受到温度、湿度、气压等因素的影响。

共焦法则是利用几何光学的聚焦原理进行距离测量，即从一个点光源出射探测光，经透镜聚焦后，照射被测物表面。从理论上讲，如果物体恰好位于焦点处，则反射光通过原透镜应当汇聚返回至光源处，也就是所谓的共焦。此时在反射光的光路上添加一块半反半透镜，将反射光束折向带有小孔的挡板，该小孔的位置相当于光源，利用光度计测量小孔处的反射光强度，当强度最大时物体即位于透镜焦点平面上，这样就可测得被测物点的位置信息。光谱共焦法是共焦法中一种常用的测量方法，其测量原理如图8-9所示。由光源射出的一束多色光（呈白色），通过探头中的系列光镜组发生光谱色散，形成不同波长的单色光；经过出厂前校准，使每一个波长都对应一个到被测物体的距离值，只有能在被测物体表面准确共焦的单色光在经过一系列光学反射后，才可在高灵敏的感光片上成像。光谱仪可识别单色光的波长，并将其换算为距离值。



图8-9　光谱共焦法的原理图

在航空制造领域，飞机发动机技术占据了至关重要的位置，而叶片是航空发动机中型面复杂、尺寸变化大的零件。叶片的加工质量决定着叶片的工作性能。随着发动机性能的不断提升，对叶片型面检测精度和检测效率的要求也越来越高。目前的叶片检测主要依赖于传统的接触式触发测量，国外的非接触扫描测量正在进入航空制造领域。

接触触发测量速度慢，测量效率低，在对空间曲面的测量上具有很大的局限性，对尺寸很小的零件特征（例如叶尖半径为0.1mm的叶片边缘等）的测量误差较大，甚至根本无法进行测量。目前，国际领先的叶片类零件测量技术是采用白光点结构光测头，配合高精度转台和多轴联动的坐标测量机，实现高精度高效率连续扫描测量。采用非接触白光扫描测头，实现曲面类零件的高效精密扫描测量，该技术对发动机叶片的测量具有突破性意义。白光扫描非接触测量目前主要应用于发动机叶片的测量，其在航空航天、汽车、电力等领域也具有广泛的应用前景。

测量机上对叶片等三维复杂曲面测量主要依靠结构光测头，即投射光束到工件表面，形成被测点云要素。投射的光束包括面结构光、线光和点光。面结构光包括光栅法等，可瞬间完成区域表面的测量，测量效率最高，但精度较低，目前可以达到50μm左右的测量精度。线光测头投射光线束到工件表面，通过逐线扫描完成表面的测量，测量效率较高，是目前测量机应用最多的扫描测量方式，精度可以达到20μm左右。点光测头投射光点到工件表面，对工件表面进行逐点扫描，相对线扫描方式效率较低，但测量精度可以达到10μm左右，对航空发动机叶片型面等测量精度要求较高的场合更适用。

光学测头不仅用在坐标测量机上，在数控加工机床也有应用前景。近年，数控加工机床自身配备在机（在线）检测功能越来越普遍；实现在机检测的必备条件之一就是配备测头传感器；光学扫描测量在叶片加工机床上的应用是当前的热点研究方向。

光学测头的性能和精度水平直接影响坐标测量机的测量精度和可靠性，光学测头的性能是限制光学扫描测量精度的主要因素，光学扫描坐标测量机能否适应现代高速度、高精度和多功能的测量要求，主要依赖于光学测头的发展完善。

目前掌握光学扫描坐标测量核心技术的主要国外厂家包括：温泽、蔡司、尼康、三丰、海克斯康、Wolf &Beck、NexTec 等公司，其中多数测量机生产厂家是通过购买光学测头技术产权，形成自己的光学坐标测量机测头产品品牌。

8.2.3 光学精密坐标测量技术在航空零部件制造中的应用

航空产品的复杂性使零部件各具特点，不同的零部件在生产及装配过程中有不同的快速检测需求。例如，大型机加零件（梁、框、肋类零件）需要对其轮廓外形、筋条位置与高度、孔位等尺寸进行快速检测。飞机蒙皮和整流罩类立体复杂曲面钣金件需要对其型面、切边与开口位置和尺寸进行快速检测。平板类钣金零件需要对其型面、弯边、切边和下陷等尺寸进行快速检测；复材壁板需要对其型面、切边、长桁位置等尺寸进行快速检测。而在飞机装配过程中，既有对点（交点、装配基准点、关键特征点）精确测量的需要，也有对复杂型面的测量需求。

（1）发动机叶片检测的需求

在航空制造领域，发动机叶片制造占据了至关重要的位置；叶片是航空发动机中型面复杂、尺寸变化大、工作环境恶劣的零件，叶片的加工质量决定着发动机的工作性能。叶片的型面和进排气边对发动机的能量转换效率有着巨大的影响，因此，在发动机零部件的检测中，叶片型面和进排气边的检测意义重大，是目前仍然没有很好解决手段的瓶颈技术。随着发动机性能的不断提升，叶片型面检测精度要求也越来越高。出于保障飞行安全的需要，叶片精度的检测要求十分严格，检测工作量巨大，对检测效率要求很高，传统的接触触发式坐标测量机不能满足需求。

叶片形状和检测要求有几个显著特点：

①叶片的型面是空间自由曲面，每个截面的型线轮廓形状不尽相同，并且同时呈扭转上升状；

②叶片的前后缘部分相对厚度较薄，尤其是出气边的半径非常小，最小叶尖半径小于 0.2mm，并且该半径随高度位置而变化；

③叶片缺乏规则表面，建立零件基准困难，与理论模型比较与误差评判复杂。叶片榫根部分精度高，精确测量困难。

④叶片零件生产量大，由于精度要求高，每个零件需要采用单件制造的生产方式，在生产中的测量工作量巨大，需高效率的测量方法。

目前的叶片检测主要依赖于传统的接触式三坐标测量机。接触式三坐标测量机采用接触触发测头测量，测量采点速度慢，测量效率低；空间复杂曲面的测量采点数量巨大，单点触发式测量效率很难大幅提升。接触式测量由于测尖球头的存在，对尺寸很小的零件特征（例如叶尖半径为 0.2mm 的叶片边缘等）的测量误差很大，甚至根本无法测量，接触

式坐标测量用于叶片进排气边的检测功能因此受限。

（2）数字化检测技术

飞机结构复杂，零件种类繁多，工艺特点不同，检测手段和方法具有多样性，基于全三维模型的飞机数字化检测技术研究涉及多学科多领域，有很大的技术难度。通过基于全三维模型的飞机数字化检测技术体系的研究与建立，可以提供适合不同生产线应用的快速技术和方法，彻底改变目前传统的零部件检测方式，打通飞机复杂零件与部件数字化设计、制造、检测一体化流程，提升飞机零部件检测效率与水平。基于三维模型的数字化检测技术应用已成为关键环节。设计开发数字化测量系统，以形成设计、制造和检测共同组成的闭环生产制造体系，对于保证制造质量、提高生产效率、提升制造工艺等具有非常重要的意义。本专业所面临的具体任务：解决商用发动机制造过程及装配中的尺寸检测问题，以通用量具及制造常用检测方法为基础，建立一个基于 MBD 的检测数字化示范过程。针对各种量具的数据输出，进行数字化改造，使量具具备数字化标准格式输出能力，将相关数据与 MBD 相结合，实现商用发动机零件的全数字化快速检测。在此基础上，研究测量数据处理与质量评判技术、基于三维模型的检测规划技术和飞机零件典型检测特征与质量控制方法，进而探索飞机数字化快速检测系统应用模式，结合 MES/ERP 等管理系统，将测量数据进行实时反馈，实现飞机零部件的快速检测，最终形成飞机数字化设计—制造—检验的闭环控制，提升飞机零部件的检测效率与水平。

（3）机匣类大型部件精密检测技术

航空发动机机匣类大型零部件，特点是尺寸大、特征多、形状复杂、精度要求高，现有测量手段不能很好满足测量需求。研制大型五轴精密坐标测量系统；通过对多轴坐标测量方法的研究，研制基于五轴运动、多种测头兼容的大型龙门式坐标测量系统，提高航空机匣的测量效率和测量精度。该系统由三坐标龙门式测量装置本体、光学扫描测头、旋转工作台、测头旋转轴、控制系统和测量软件等组成；解决发动机机匣类大型复杂构件高效精密测量难题。

（4）喷嘴等微小精密组件快速检测技术

航空发动机喷嘴类微小零件特征的快速精密检测目前没有理想的解决手段，对新型测量测试技术需求迫切。研究实现微小复杂零件的快速、精密检测，构建微小零件特征非接触五轴测量系统，实现微小轮廓的快速准确测量，获得准确的几何尺寸和位置信息，可实现微小零件特征信息的精密、高一致性的快速检测和评价。

（5）叶片进排气边检测

航空发动机复杂叶片及进排气边微小圆弧高效、精密的检测需求迫切。开展基于五轴联动高精度数控系统和锥光偏振全息激光测头的在位精密检测技术研究，突破多轴联动非接触检测和高陡度曲面误差补偿的关键技术，最终解决我国商用发动机叶片进排气边的在位高效、精密检测问题。

（6）复杂曲面零件在线非接触检测技术

整体叶盘、叶片、机匣及涡轮盘等复杂曲面零件，在加工过程中，为避免二次装卡带来的误差，需要采用在线检测技术，获得零件的精度；同时，为了提高检测效率，需要采用非接触检测技术。研究多轴运动控制技术、测量和控制软件，实现发动机叶片的非接触光学扫描测量，通过对复杂曲面光学非接触测量方法的研究，研制由光学扫描测头、机床

刀库标准模块和在线非接触检测软件，解决目前商用发动机制造中叶片等复杂曲面测量效率低和精度差等难题，可将叶片的测量与制造技术提升一个台阶。

（7）发动机空心细长轴精密检测技术

针对大深径比空心细长阶梯轴的线性度、壁厚等关键指标，采用多轴测量架构，配以多测头联合测量方法，开发高精度的深孔测量装置，实现对轴线性度、壁厚等尺寸的精确测量，解决发动机空心细长轴类零件加工测量难题。

（8）静子导流叶片等部件装配精度状态检测

在发动机装配生产线上搭建在线静子导流叶片安装角检测系统，实现压气机静子导流叶片安装角的快速、高效检测，保障压气机装配后静子导流叶片安装角的一致性。

（9）发动机回转类部件装配检测平台

针对发动机回转类部件高精度装配的难题，研制精密装配、检测一体化平台，设计满足要求的工装夹具，并编制相应的装配与检测标准，实现发动机回转类部件的高效、精密装配与检测。

（10）机匣等部件工况下尺寸位置精度检测技术

发动机机匣变形综合精密测试系统及校准技术需要研发测量测试平台支持；不但检测机匣的总体变形，还通过研制具有温度补偿功能的微位移传感器，测试轴承座相对机匣的相对静、动态变形，并通过开发的仿真和数据分析软件，间接获得机匣总体变形及轴承座与外机匣的相对变形，检测发动机振动、转子静子同心度对发动机性能的影响。

8.3 叶片类复杂曲面零件光学扫描坐标测量技术

发动机叶片是典型的复杂曲面零件，传统的叶片型面接触触发式坐标测量效率低，测量叶片进排气边等微小零件特征功能受限，不能满足现代航空制造的需求。多轴光学扫描精密坐标测量效率高，在测量复杂曲面和微小零件特征等方面具有明显优势；随着光学测头精度的提高，光学扫描精密坐标测量机正在步入航空发动机制造领域，必将占有越来越多的市场份额。实现光学扫描精密坐标测量，需要突破几方面的关键技术，包括高精度光学测头、光学测头的空间矢量位置精确标定、精密运动平台和回转工作台、测量机多轴联动数控系统、数据同步采集、多轴测量运动轨迹规划和复杂曲面测量数据处理软件等。

8.3.1 发动机叶片多轴光学扫描坐标测量机总体方案

光学扫描坐标测量机组成包括：三坐标测量机本体、光学测头、测头转位转台、工件转位转台、运动控制系统与测量软件等。光学扫描坐标测量机采用的方案包括三轴联动扫描、四轴联动和五轴联动扫描等；多轴（四轴或四轴以上）联动技术复杂，但更具发展前景。

三坐标光学扫描需要结合二维测头转位座（普遍采用雷尼绍的PH10测头座）完成整个工件的测量。二维测头转位座为分度转角（PH10为7.5°），所以三轴扫描不能实现光学测头入射光线与工件法线夹角保持恒定不变。由于光学测头的“角度特性”，在一定程

度上会影响测量精度；并且测量过程中测头频繁转位对测量效率有一定影响。

多轴（四轴或四轴以上）联动光学扫描可以实现测头入射光线与工件表面的法线夹角基本不变，有利于高精度测量的实现。多轴扫描测量过程中，测头转台或工件转台连续旋转，形成多轴联动测量运动，实现对整个工件表面的连续测量。

典型的两种光学扫描坐标测量布局方案是 *AB* 轴方案和 *AC* 轴方案，如图 8－10 和图 8－11 所示。

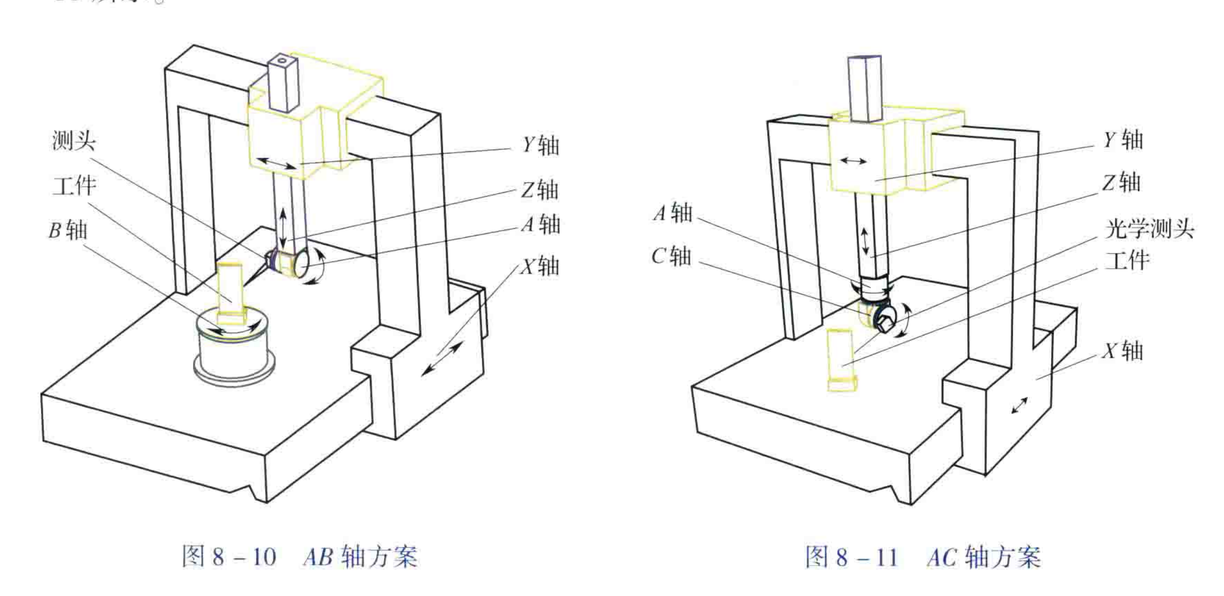


图 8－10　*AB* 轴方案　　　　图 8－11　*AC* 轴方案

8.3.2　光学测头空间位置标定技术

光学测头空间位置矢量的标定是指在具有笛卡尔坐标系坐标测量机中，准确标定测量光学测头投射光线方向与坐标测量机运动轴线的夹角，通常称为光学测头的外标定。只有实现了光学测头空间位置的准确标定，才能实现光学测头坐标系与测量机坐标系的叠加整合，从而完成零件的精确坐标测量。

在坐标测量机三个直线运动轴（*X* 轴、*Y* 轴和 *Z* 轴）运动过程中，光学测头光束的矢量方向是不变的；测头安装完毕后，需要标定测头光束的初始位置矢量，即需要标定光学测头投射光线与三坐标测量机 *X* 轴的夹角 α、与 *Y* 轴的夹角 β、与 *Z* 轴的夹角 γ 和测头光束零位在测量机坐标系中的位置坐标。

光学测头空间位置标定是影响光学扫描测量精度的重要因素。标定方法有标准球测量法、角度块等步距法等。标准球法使用的检具简单，制造成本低并容易获得高的制造精度，但标定算法比较复杂；国外光学扫描坐标测量机多采用标准球测量标定方法。

8.3.3　激光扫描测头与白光扫描测头的比较

坐标测量机光学扫描测头普遍采用光学三角法测量原理，从光源种类上区分有激光和白光两种。目前商品化测头多数为激光三角法测头，但对发动机叶片等精密加工的零件测量，白光测头具有更好的应用效果，但技术难度更大。

激光作为一种准直、相干的单色光，被广泛用作测头光源。白光则是由各种不同波长的光组合而成的，因此颜色呈现白色。激光和白光的最大区别在于：激光是一种单色光，

拥有高度相干性；而白光包含各种波长的光，因此相干性相当微弱。

单色光的高度相干性会干扰测量效果。激光测头利用物体表面的反射光进行三角法测量时，为提高测量分辨率和准确性，光点在物体上所覆盖的区域应尽可能小、成像光斑的形状应尽可能规则。正因如此，一般光学测头中采用经过准直、细化处理的激光光束。对于光滑金属表面，激光的相干性会产生明显的散斑效果，导致成像光斑外轮廓形状散乱，直接影响光斑中心提取效果，影响光滑表面的测量精度。激光三角法测量在光滑表面测量方面仍有一定局限性。

白光测头对是否光滑表面基本不敏感，但白光的光束准直、细化处理难度大，光源体积较大并且发热，需要利用光纤将光能传输到光学测头。由于白光光束能量密度低，对环境光的干扰比较敏感。

目前国外激光与白光测头的发展是并行提高的。随着激光技术不断发展完善，近年出现了对于光滑金属表面也可以测量的激光测头，激光测头是目前市场的主流。

目前市场上国外测量机配备的光学扫描测头，除了 Wenzel 为白光测头，其他公司都是激光测头。尼康和 NexTec 等公司针对叶片测量开发的激光扫描测头，精度最高可以到 10μm 量级，与白光测头的精度指标基本相当。

其他通用光学测头生产厂家，如日本基恩士、德国米铱等，都陆续研发出适用于光滑金属表面的激光测头，但是这些测头不是针对坐标测量机应用而开发的，不能直接应用坐标测量机上。

8.3.4 多轴测量系统静态、动态误差分析与补偿

静态误差分析与补偿技术对提高测量系统精度具有重要意义，是坐标测量机结构设计的基础。从提高构件制造精度和整机的装配精度着手来保证测量机的精度不仅要提高成本，而且提高的精度十分有限。三坐标测量机通常采用 21 项误差补偿，已经取得很好应用效果；多轴测量系统的误差分析与补偿尚需发展和完善。

传统观点认为三坐标测量机工作在准静态状况下，其动态误差较小；但随着扫描测量机及非接触测量机的推广应用与全面普及，对测量机动态特性的要求越来越高。

动态误差是测量装置工作在加减速过程中，由于惯性力等产生的实际位置偏离理想位置的误差。系统部件的质量、刚度和阻尼特性会影响测量系统的动态性能；为了减小动态误差，刚度和质量之比应该尽可能的大，系统的扭转刚度尤为重要。动态误差直接与运动加速度相关，其随时间变化的特性，导致较难建立精确的模型，因此以往的测量机通常都作为随机误差处理。高精度高速响应的坐标测量机设计时需要对动态误差应给予充分重视，力学仿真技术是动态误差分析与控制的有效手段。下图是某型测量机在 0.1g 加速度下的动态误差仿真分析结果，测头位置最大变形达到 20μm 以上，如图 8－12 所示。

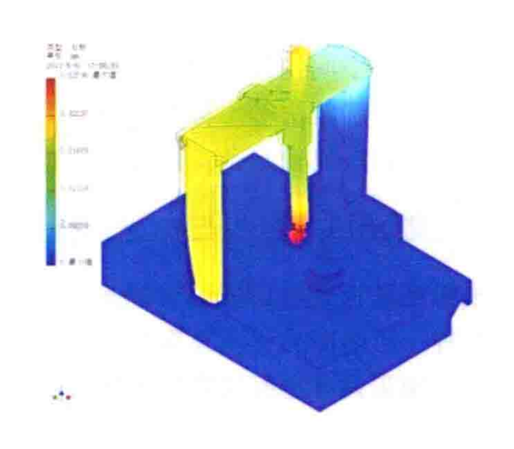


图 8－12 测量机动态误差仿真分析图

8.3.5 高精度转台技术

由于三维接触触发测头的“万向”触发性能，触发测头可以触测任意方向的零件表面。对光学扫描测量机，测头投射光线与工件表面法线夹角虽然可以在一定范围内变动，但变动范围较大时会影响光学测头的测量精度，即光学测头有“角度特性”；增加回转台的多轴测量机（四轴或四轴以上）可以实现叶片曲面表面的连续扫描测量，并将测头光轴与工件表面法线夹角控制在要求的范围以内。

传统坐标测量机通常不配置工件回转工作台，原因是一般转台不能满足测量精度要求；普通转台5s左右的转角位置精度和5μm左右的几何运动精度（轴向窜动、径向跳动等）不能满足坐标测量机微米级测量精度的要求。

近年在叶片扫描测量中，采用配置回转台的多轴坐标测量机成为发展趋势。温泽、蔡司、海克斯康等公司已经推出了多轴坐标测量机。多轴光学扫描坐标测量机测量效率高，通过多轴联动运动轨迹规划，可以使光学测头工作在理想的工作状态，有利于获得更高的测量精度。

多轴测量机中的转台包括工件回转台（*B*轴）和测头转台（*A*轴和*C*轴）。从测量运动精度和运动轨迹规划的实现难易程度考虑，*AB*轴方案更易实现，也是目前多数国外公司采用的方案。

工件回转工作台（*B*轴）对多轴坐标测量精度影响显著，目前一般采用空气静压轴承转台；气体静压轴承采用空气为润滑介质，可以实现极高的回转精度、无磨损、振动小，噪声低，是精密测量的最佳选择。空气静压轴承转台比同类机械轴承转台的精度高一个数量级，几何运动精度可以达到0.1μm量级，转角位置精度可达到1″量级；空气静压主轴的主要缺点是承载能力和支承刚度较低。通过合理结构设计和参数选择，可满足扫描测量的技术要求。

测头回转台一般采用直驱微型马达，转角位置精度可以控制到10″量级，几何运动精度可控制到3μm量级。

8.3.6 多轴坐标测量机电控与软件系统

三坐标测量机的运动控制与测量软件已经比较成熟，但目前国内市场上商品化坐标测量机运动控制器和测量软件系统由国外几家公司产品垄断；叶片光学扫描测量的多轴联动坐标测量机运动控制与软件尚在发展完善阶段，技术仍有很大发展空间。

与数控加工机床运动控制器相比，坐标测量机运动控制器对实时性要求较高，即需要将实时获得的测量信息与下一步运动控制协调；普通数控加工机床控制系统不能满足测量机的运动控制要求。目前流行的测量机控制方案多采用上位机—下位机的运动控制策略，测量机电控系统总体结构如图8-13所示。

采用主流工控PC计算机（上位机）与专用DSP多轴运动轴控及数据采集系统（下位机）相结合的二级位置闭环数字复合控制结构，多计算机控制方式既可满足系统的快速性、实时性要求，也为配置和操作提供了灵活性。

上位机包括PC机、测量前端软件、系统控制软件和同步卡。上位机提供操作者灵活的测量操作，同时负责测量数据的坐标系转换、图形拟合、数模比较和误差补偿等工作，上位机和下位机间通过以太网连接，两者使用TCP/IP协议作为通信协议。

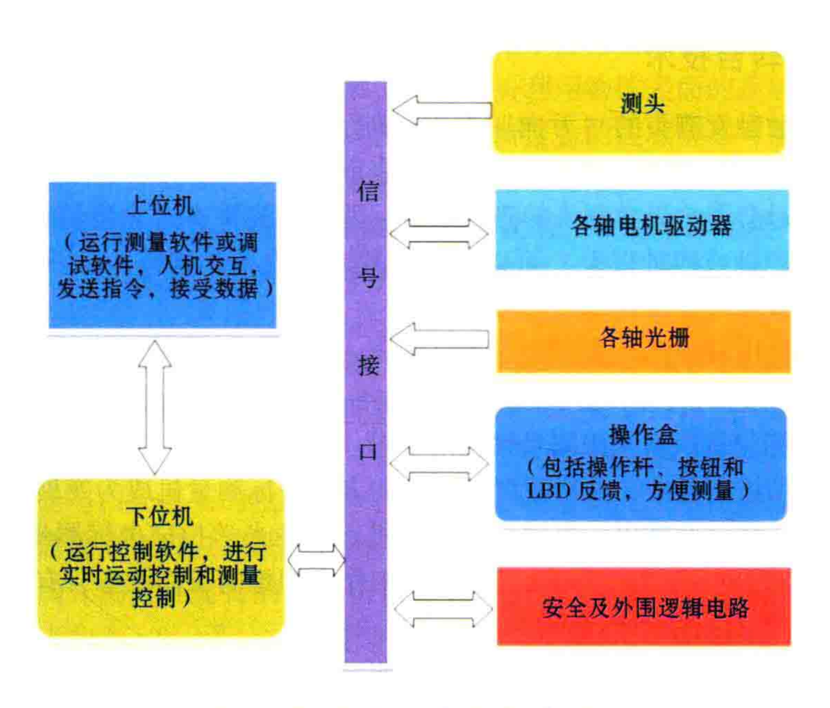


图 8－13　测量机电控系统总体结构

系统控制软件是整个测控系统的核心与枢纽，它负责通过 I＋＋协议与测量前端软件进行数据交互，通过控制器接口与下位机进行通信，通过测头模块采集测头的测量数据，通过同步模块控制同步卡发送信号，从而达到测头数据和控制器位置数据的同步采集。

下位机需要完成以下任务：

①与上位机间进行通信。

②根据上位机发送的测量指令，规划测量任务运动轨迹，并分解为各个轴的直线或旋转运动；进行各个坐标轴的运动伺服控制，主要控制算法是 PID 控制，为了追求更好的控制性能，加入 NOTCH 滤波器、前馈等伺服算法。

③与测头通信，采集测量数据。

④操作盒管理，在手动模式下接受操作盒的运动指令，并反馈状态信息。

⑤本地 I/O 管理。

⑥回零等事务程序管理。

⑦测量系统故障监测和安全保护等。

测头控制器不仅将光学测头采集的图像转换为位置坐标信息，而且需要根据图像质量，调整投射光的功率。

8.4　光学扫描坐标测量系统误差分析

分析影响光学坐标测量系统测量误差的因素，并针对各个因素进行分析，确定各个因素对测量误差影响的大小。光学坐标测量系统是在三坐标测量机的基础上，加装空气轴承转台辅助被测工件转位，使用 PH10M 测头座带动光学测头调整光轴方向，如图

8－14 所示。

精度是光学坐标测量系统的基础，对精度研究可以为机械结构精度、测头精度和位置关系标定精度。本节在讨论光学坐标测量系统机械机构精度的基础上，建立了转台轴线标定算法，实现转台轴线的快速高精度标定。



图 8－14　光学坐标测量系统

8.4.1　三坐标测量机的 21 项误差分析

LK 公司的 J. 布里教授于 1985 年 3 月在北京欧洲机床高科技技术座谈会上讲授：三坐标测量机有 21 项误差，这种误差分析方法目前被测量机行业广泛接受。这种误差分析方法基于以下假设：

①以刚体模型为基础，机器本身的力变形都归结为相应轴的机构误差源；

②九项运动角摆是相互独立的；

③系统误差均应连续且变化平缓。

通常将坐标测量机的几何参数误差按其在各运动自由度方向作用分类，分为 3 项示值误差 D_{xx}，D_{yy}，D_{zz}；6 项直线度误差 D_{xy}，D_{xz}，D_{yx}，D_{yz}，D_{zx}，D_{zy}；9 项角摆误差 d_{xx}，d_{xy}，d_{xz}，d_{yx}，d_{yy}，d_{yz}，d_{zx}，d_{zy}，d_{zz}，以及 3 轴相互之间的 3 项垂直度误差 Q_{xy}，Q_{yz}，Q_{zx}，共 21 项参数误差，图 8－15 所示。

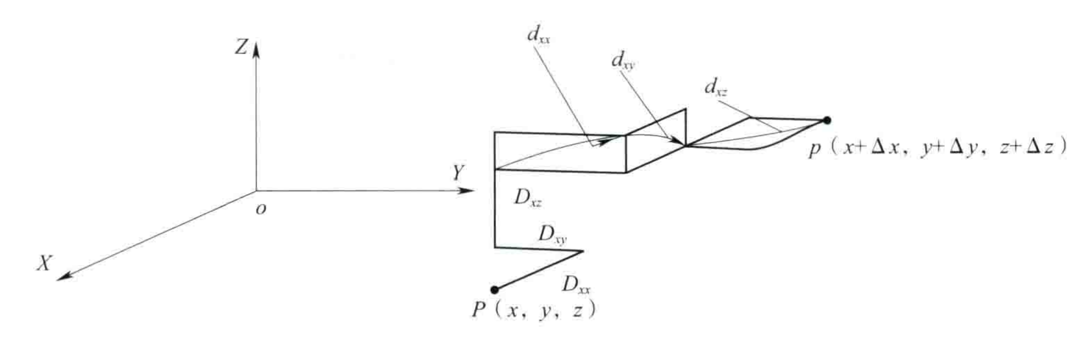


图 8－15　三坐标测量机单一导轨 7 项误差示意图

其中，示值误差是光栅读数头读取光栅尺数据时产生的，在光栅长度方向线性增加，在测量机使用前，使用激光干涉仪进行校准，将校准的结果输入补偿软件即可获得较高的示值精度。直线度误差是三坐标测量机某一个轴的导轨在制造过程中，由于制造误差，产生的在另外两个轴的方向上的误差，三个方向的直线度误差通过基准平尺进行校准。角摆误差是三坐标测量机的阿贝误差，在导轨制造的过程中，由于制造精度，使得测量机气垫在某一轴的某一位置产生绕 X、Y、Z 三个轴方向的旋转，使用水平仪或准直光管等，将三个坐标轴不同位置的绕三个方向的角摆测量出来，d_{zz} 角摆使用直角尺测量，d_{xz}，d_{yz} 角摆通过光电自准直仪测量，在得到所有的角摆测量数据后，按照补偿算法进行补偿。垂直度误差是在测量机装配的过程中，由于装配的误差，造成导轨两两之间不垂直，在测量机其他 18 项误差补偿过后，通过测量块规，计算出 3 个垂直度误差，通过机械结构调整，

减小垂直度误差的影响。

现今对三坐标测量机 21 项误差的补偿算法已经非常成熟，通常是将 21 项误差的数据逐项输入到补偿软件中就能够实现补偿功能，本章中不再赘述。

8.4.2 多轴坐标测量中转台误差分析

转台轴承包括空气静压和液体静压两大类。和机械轴承相比，空气轴承具有许多优点：

①能适用于各种高温、低温环境；

②气体黏性极小，可以认为摩擦很小或无摩擦，因此具有高转速工作能力；

③噪声和振动小；

④寿命长；

⑤加工误差能被气体膜层均化，因而旋转精度极高；

⑥不受辐射的影响，维护简单。

尽管伴随承载能力低、刚度低、加工技术要求高等缺点，在对转角定位精度要求较高时，空气轴承仍然是精密仪器的首选。在使用空气轴承转台辅助工件回转的过程中，主要影响测量精度的空气轴承转台主要技术指标有回转定位精度、角摆精度、径向跳动、轴向跳动等。

8.4.2.1 空气轴承转台的角摆误差

空气轴承的加工误差尽管能被气体膜层均化，仍然会造成空气轴承在轴向、径向产生跳动，轴承的回转轴线产生角摆，与理论轴线产生夹角，使得测量过程中产生测量误差。通过千分表监视旋转的空气轴承转台，可以得到转台径向跳动和轴向跳动的大小。在转台装配完成后，控制转台进行分度转位，使用水平仪记录下每个分度位置转台在相互垂直的两个方向（X 向和 Y 向）下的偏移量，便可计算出转台的角摆误差。

角摆误差如图 8－16 所示，图中 A 点为被测点的实际位置，B 点为被测点的理论位置，θ 为转台当前的角摆。当转台的角摆误差 θ 很小时，A、B 两点之间的误差可以表示为 θ_L。由此可见，和转台轴线的标定误差相似，转台角摆误差也会和被测工件的高度成正比，被测工件高度越高，因转台角摆误差带来的测量误差越大。在 500mm 的工作高度下，±0.3″角摆误差带来的测量误差为 0.75μm。一般空气静压转台的径向跳动和轴向跳动均小于 0.1μm，对光学坐标测量系统的整体测量精度影响不大。

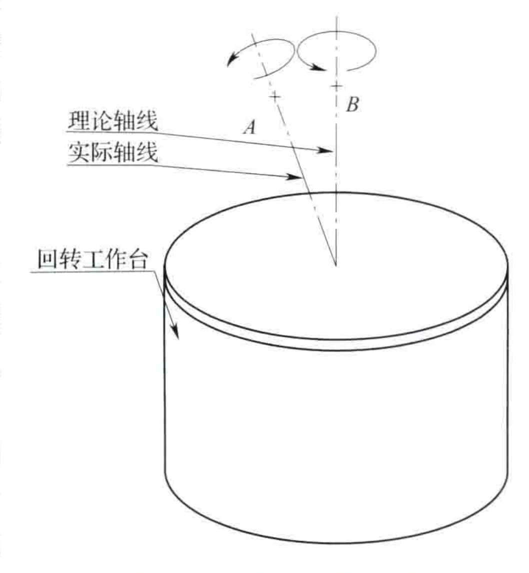


图 8－16 角摆误差理论模型

8.4.2.2 空气轴承转台的转角定位误差

如图 8－17 所示，A 点为上被测点的理论位置，B 点为被测点的实际位置。当回转定位精度很高时，因转台定位误差引起的测量误差为 θ_L。由此可见，转台回转定位误差带来的测量误差，除了与转台回转定位精度成正比之外，还同被测工件测量的宽度尺寸成正比，被测工件宽度尺寸越大，因转台回转定位误差带来的测量误差也就越大。

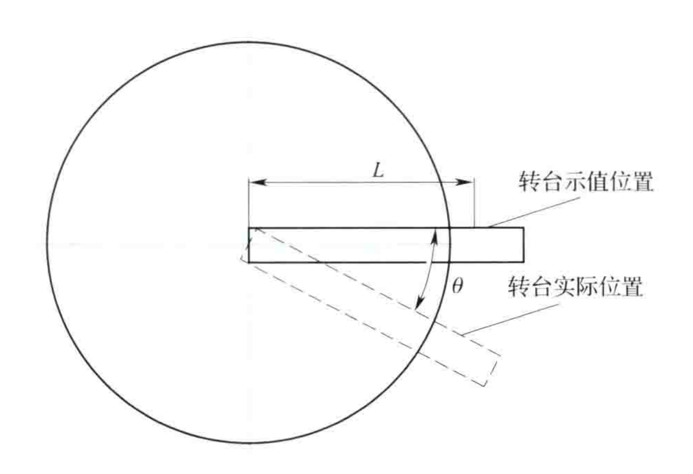


图 8 - 17　转台回转误差模型

使用 23 面体棱镜和光电自准直仪对空气轴承转台的定位精度误差进行测量并补偿，使用 24 面体棱镜进行补偿后定位精度误差测量，得到转台补偿后的定位精度≤1″。

如将转台放置在测量机 Y 轴行程中间，考虑到非接触测头的量程和 PH10M 测头座的转位安全，转台最大可承载直径 400mm 的被测物。将被测物在转台上找正之后，被测物回转半径为 200mm，由此可以计算得到由回转定位精度带来的测量误差最大可以达到 0. 8μm。对光学坐标测量系统的整体测量精度影响不大。

8. 4. 2. 3　空气轴承转台轴线的标定

将被测物放置在空气轴承转台上进行转位时，由于在不同的转台角度下得到的测量点不在同一个坐标系下，我们需要以转台轴线为极轴建立一个极坐标系，将不同转台角度下的测量数据统一到一个坐标系下，从而得到测量结果。因此，我们需要对转台的回转轴线进行标定。

将空气轴承转台安装在三坐标测量机上，通过调整地面三个可调支点，使得转台的回转轴线尽可能与测量机的 Z 轴平行。



图 8 - 18　空气轴承转台

对旋转轴进行空间位置参数标定，实际上就是确定旋转轴 O' 所在空间的直线方程。而空间直线 L 方程可表示为

$$\frac{x - x_O}{n_x} = \frac{y - y_O}{n_y} = \frac{z - z_O}{n_z} \tag{8 - 1}$$

式中，n_x，n_y，n_z 为空间直线 L 的矢量方向，（x_O，y_O，z_O）表示空间直线 L 通过的空间点坐标。因此只需要得到旋转轴 O' 所在空间直线上的点坐标（x_O，y_O，z_O）和方向（n_x，n_y，n_z）即可计算得到旋转轴线的空间位置参数方程。

根据以上分析，通过在转台工作平面上放置标准球或者放置高低两个标准球可以完成上述标定。但由于标定的过程中，需要在多个转台角度下测量标准球的球心坐标，因此标定过程较繁琐。

将标定工装置于旋转工作台上，用三个可调式千斤顶作支撑。调节千斤顶，利用千分表找正工装上端面，使表针读数在 0.001mm 以内，以保证上端面的法线方向与旋转台转轴方向平行；同时用另一个千分表找正工装内孔在 0.001mm 以内，最终保证内孔轴线与旋转轴重合，如图 8－19 所示。



图 8－19　利用千分表找正工装轴线示意图

为了提高测量精度，用接触式测头代替光学扫描测头进行测量（接触式测量机的测量精度为 $2.8 + L/350\mu m$）。首先在标定工装上端面任意测量三个点，分别记为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$，$P_2(x_2, y_2, z_2)$，$P_3(x_3, y_3, z_3)$。则上端面三点 P_1，P_2，P_3 所在平面的法矢 $\boldsymbol{N}$ 表示为：

$$\boldsymbol{N} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \end{bmatrix} \tag{8-2}$$

即可计算出旋转工作台中心轴线的单位矢量方向（n_x，n_y，n_z）。根据实际测量，计算得出旋转工作台中心轴线的单位矢量方向数为：$[n_x, n_y, n_z] = [0.00859, 0.00215, 0.99996]$。将测头移至工装内孔靠近工装上端面任意截面位置处，测量内孔三个点，记为 O_1，O_2，O_3。由 O_1，O_2，O_3 三点坐标可求出三点所在圆心 O 的坐标（x_O，y_O，z_O）。根据试验，计算出工装内孔圆心坐标为（x_O，y_O，z_O）＝（825.10629，182.87559，－727.43656）。则该点 O 是旋转轴 O' 上的点。从而计算出旋转轴空间直线方程 L。由此可知，利用标定工装的基准面和基准孔特征要素即可实现旋转轴 O' 空间位置参数的标定。

8.4.3　四轴测量过程中的测量误差

将标定球置于旋转工作台上，将旋转工作台回零，用接触式测量机测量标定球的球心 C_0，得到测量点 C_0 的坐标（767.54989，179.78353，－624.59716）。然后顺时针按 30°、60°、…、330°旋转工作台，并记下上述标定球球心坐标 C_i（$i=0$，30，60，…，330）。根据初始位置坐标值 C_0，利用上述旋转轴数据整合算法分别计算在 30°、60°、…、330°的坐标值 C_i'（$i=0$、30，60，…，330），并将 C_i 与 C_i' 进行比对，比值用 $\Delta C = |C_i - C_i'|$ 表示，所列数据取到小数点后三位，所有数据单位为毫米（mm）。具体见表 8－1。

表 8-1 不同位置标定球试验与数据整合统计

旋转位置	$C_i(i=0, 30, 60, \cdots, 330)$	$C_i'(i=0, 30, 60, \cdots, 330)$	误差值 $\Delta C = \lvert C_i - C_i' \rvert$			
			ΔX	ΔY	ΔZ	ΔC
0°	767.550, 179.784, -624.597	—	—	—	—	—
30°	773.730, 209.437, -624.712	773.722, 209.446, -624.714	0.008	0.009	0.002	0.0122
60°	793.888, 232.036, -624.934	793.898, 232.048, -624.936	0.010	0.012	0.002	0.0157
90°	822.684, 241.521, -625.206	822.672, 241.533, -625.203	0.012	0.012	0.003	0.0172
120°	852.328, 235.368, -625.446	852.334, 235.360, -625.445	0.006	0.008	0.001	0.0100
150°	874.924, 215.171, -625.599	874.935, 215.183, -625.596	0.011	0.012	0.003	0.0166
180°	884.430, 186.410, -625.614	884.420, 186.408, -625.615	0.010	0.002	0.001	0.0102
210°	878.256, 156.734, -625.495	878.248, 156.745, -625.498	0.008	0.011	0.003	0.0139
240°	858.061, 134.135, -625.273	858.072, 134.143, -625.276	0.011	0.008	0.003	0.0139
270°	829.309, 124.649, -625.007	829.298, 124.658, -625.009	0.011	0.009	0.002	0.0144
300°	799.645, 130.824, -624.764	799.637, 130.831, -624.767	0.008	0.007	0.003	0.0110
330°	777.042, 151.014, -624.614	777.035, 151.009, -624.617	0.007	0.005	0.003	0.0091

通过对比可以看出，在对标定球进行 11 个点位测量中，通过实际旋转测量得到的数值与通过旋转标定方法和数据整合算法得到的数值在 X 轴上最大偏差为 0.012mm，在 Y 轴上最大偏差为 0.012mm，在 Z 轴上最大偏差为 0.003mm，最大理论偏差 0.0172mm。由于该接触式测量机的测量精度为（$\pm 2.8 + L/350$）μm，气浮转台定位精度为 ±1″，说明该工装标定方法和数据整合算法的精度在 ±10μm 以内，达到了微米级。

8.4.4 光学测头光束方向标定误差分析

在使用接触式测头测量被测工件时，通常也会使用类似 PH10 系列测头座这种产品辅助测头进行转位，以便能够测量各种开敞性不好的工件。在测量的过程中，需要针对每一个测量所需的角度，对测头进行标定，以获得测头到测头座之间的相对位置偏移矢量。

在使用三角法测头进行测量的过程中，我们也需要使用 PH10M 测头座辅助三角法测头转换角度。在每个角度的使用之前，我们需要对三角法测头的光束方向进行标定，并且通过在不同角度下分别测量同一个标准球的球心坐标，得到不同角度位置下，测量数据拼接的平移矩阵。如果 PH10M 测头座拥有良好的重复定位误差，在使用三角法测头测量时，仅需调用之前的标定数据而不需要重新进行标定，可以显著提高测量效率。

所使用的 PH10M 测头座具有很高的重复定位精度，其位置重复定位精度在 62mm 距离时只有 0.4μm。即使在工作距离 105mm 时使用非接触测头，其重复定位精度误差也不会超过 2μm。

接触式测头接触被测物体得到触发信号时，控制器会记录测量机三个坐标轴的当前坐标（x_0，y_0，z_0）并根据之前测头标定的结果，给出不同测头角度之间的测头偏置向量（Δx，Δy，Δz），再根据红宝石球的直径和接触点的方向，做出相应的测头半径补偿。

在使用三角法非接触测头时，我们也需要用控制器记录测量机的当前坐标（x_0，y_0，z_0），根据对标准球的测量，给出不同角度下测头的偏置向量（Δx，Δy，Δz）。与接触式测头的不同点在于，在进行"测头半径补偿"的过程中，非接触测头的补偿半径就是非接触测头的读数值，而半径补偿方向是一个未知量，需要我们在测量之间进行标定。

由图 8-20 可知，测量过程中，"测头半径补偿"的误差与"半径补偿方向"（即三角法测头光轴方向）的标定误差 θ 成正比，与测量过程中三角法测头的所使用的量程范围成正比。为了尽量减少三角法测头光轴方向标定（下简称"标定"）误差，我们需要提高标定精度，并提高轨迹规划水平，使得在测量过程中，三角法测头的量程使用范围尽可能小。

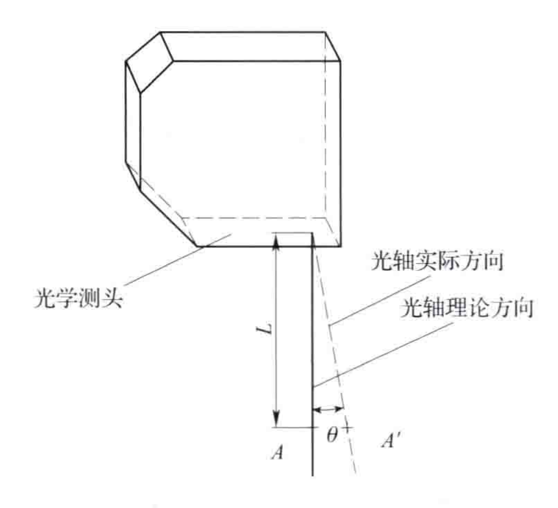


图 8-20　光学测头标定精度误差模型

8.5　光学测头光束方向的标定方法与试验

使用非接触测头进行坐标测量时，需要计算出光斑所在位置在机床坐标系或者其他工件坐标系下的坐标值，以便得到被测物的相对位置关系。

以点激光测头的光轴作为一个一维空间，设光学测头读数值为零时的光斑位置为光轴原点。在三角法测头安装的过程中，光轴原点不可避免地与坐标测量系统的机床坐标位置之间存在误差，这一误差可以用一个空间矢量来表示。在标定的过程中，三角法测头不发生旋转，则这一空间矢量在标定和使用的过程中保持不变，在计算的过程中可以省略。在此前提下，激光测头光斑位置在机床坐标系下的坐标为（$x-l\cos\alpha$，$y-l\cos\beta$，$z-l\cos\gamma$），其中，x、y、z 表示测头在该位置机床坐标系下的坐标，l 表示点激光测头的读数值，α、β、γ 分别表示光轴在机床坐标系下和三个坐标轴的夹角。由此可见，要知道光斑点坐标，我们就需要准确的标定出光轴和机床坐标系三个坐标轴的夹角，而标定的精度也就直接影响光斑坐标的准确性，从而影响整体测量精度。

在讨论光学坐标测量系统中光学测头光轴方向标定的基础上，建立了可应用于空间任意角度标定的快速标定算法，实现了光学测头光束方向的高效高精度标定。

8.5.1　现有标定方法简介

（1）光束找正标定法

该方法旨在找正三角法测头安装在 PH10 系列测头座上时，测头光束和 PH10 测头座

轴线重合。该方法不能够计算出测头光轴方向与测量过程中坐标系的具体夹角，但是，通过找正的方式，可以控制光轴方向和 PH10 系列测头座轴线的夹角在较小的范围内，使得得到的测量点具有预定的精度，如图 8－21 所示。

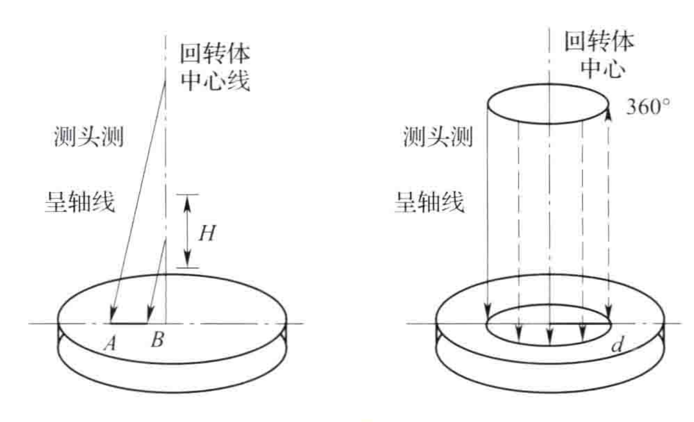


图 8－21　光束找正标定法

该方法的优点在于只需要在安装之后进行一次调整，就可以使测头在随 PH10 系列测头座转位的过程中，测头光束角度均与 PH10 测头座轴线近似平行，简化了测头在使用之前的标定过程。但在模拟接触式测头进行“测头半径补偿”时，由于测头角度受 PH10 系列测头座的回转精度影响，而尽管 PH10 系列测头座拥有极高的重复定位精度，其定位精度较差，这种标定方法的精度有待提高。

（2）两平面标定法

这是一种基于两不平行平面（且两平面不与坐标轴垂直）的标定方法，该方法旨在通过控制三角法测头在两不平行平面上分别沿三个坐标轴进行等距移动，读取测头读数值，计算出测头光轴方向与机床坐标系的夹角，如图 8－22 所示。

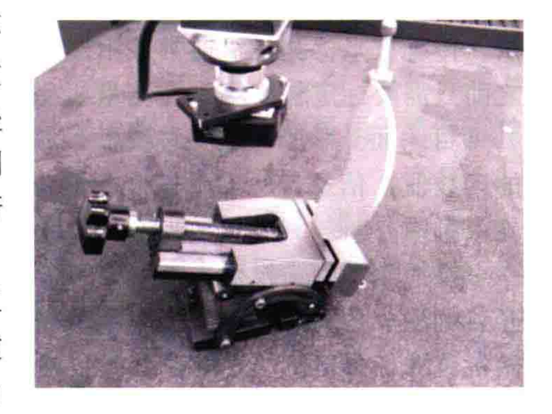


图 8－22　两平面标定法

该方法的优点在于测量方法简单，测量工装容易制作，具有较高的标定精度且便于通过数学算法进一步提高标定精度。但在空间多角度标定过程中，需要人工搬运、放置标定块，不利于实际生产测量中针对空间多光轴角度的自动标定和应用。

（3）“共轭对”标定法

该方法旨在通过控制三角法测头在同一读数值下，光斑照射在标准球的不同位置来模拟接触式测头。三角法测头所在位置的机床坐标读数值类比接触式测头工作时得到的机床坐标值行成“共轭对”，通过迭代算法，计算出“共轭对”的球心坐标，再通过两个不同读数值的“共轭对”所在球的球心连线，确定三角法测头的光轴方向，如图 8－23 所示。

该方法的优点在于算法简单，标准球可以针对空间任意角度进行较高精度标定，算法可以通过软件自动实现，便于用于生产中。

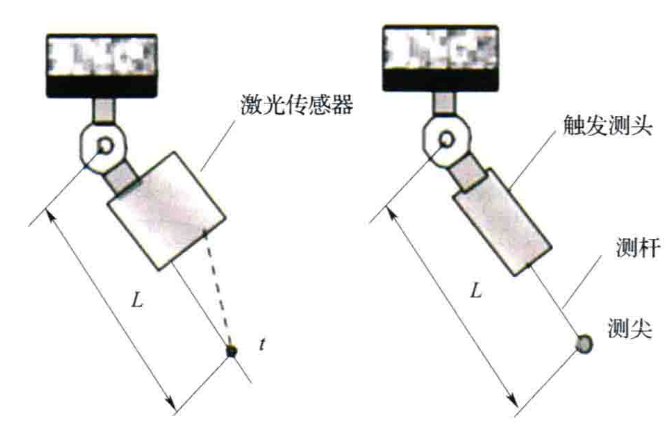


图 8－23　“共轭对”标定法

8.5.2　七点标定法理论研究

在直角坐标系（笛卡尔坐标系）的三坐标测量机中，使用点投射光学测头时，在进行零件坐标测量之前，需要准确知道光学测头投射光束矢量与测量机坐标系的关系，即需要知道光束直线方向与测量机运动轴线的夹角和光束零位在测量机坐标系中的位置，才能实现光学测头的读数值与测量机坐标数据的叠加整合，从而完成零件的精确测量。本节内容论述如何实现直角坐标系测量机中点投射光学测头的测量标定。

直角坐标系三坐标测量机（CMM）是具有三个直线运动轴（X 轴、Y 轴和 Z 轴）的测量机床，通过三个轴的运动产生坐标变动，利用测头与工件的触测实现零件表面的采样测量。传统三坐标测量机通常采用接触触发测头；接触触发测头是零位发信测头，测量零件之前只需要标定触发测头在测量机坐标系中的零位位置（测头发信位置的测量机坐标值）即可。而光学测头是一种线性位移传感器，输出光学测头与工件之间距离（光学测头的读数值）信息，所以不仅需要测量标定光学测头的零位，而且需要测量标定光学测头光束直线方向与测量机坐标轴的角度。

点投射光学测头投射光束到零件表面，在零件表面形成一个光点，光学测头可以给出该光点到测头之间的距离（光学测头的读数值）信息。只有知道光束的方向角度，才能将测量机的坐标信息与光学测头读数值进行合成，得到零件表面上光点的坐标信息，实现零件的坐标测量。

当坐标测量机三个直线运动轴（X 轴、Y 轴和 Z 轴）运动过程中，光学测头光束的方向角度是不变的；光学测头安装完毕后，需要测量标定光学测头光束的初始位置矢量，即需要标定光学测头投射光束与坐标测量机 X 轴的夹角 α、与 Y 轴的夹角 β、与 Z 轴的夹角 γ，和光学测头光束零位在测量机坐标系中的位置坐标。

点投射光学测头坐标测量机工作原理示意图见图 8－24。

光学测头七点标定的原理是：在直角坐标系测量机上利用点投射光学测头测量标准球，获取标准球表面七个光点的测量机坐标信息，并获取对应光点的光学测头读数值，利用光束直线矢量与标准球表面的空间几何关系建立联系方程，求解点投射光学测头的光束位置矢量信息。

光学测头七点标定的实施方案是：在直角坐标系测量机上，通过移动测量机运动轴，

用点投射光学测头测量标准球表面，在标准球表面按照一定规则获取七个光点的测量机坐标值和对应光点的光学测头读数值，利用七点坐标值和光学测头读数值，通过计算获得点投射光学测头光束位置矢量信息（光学测头零位坐标和光束方向角 α、β、γ，详见 8.5.2.3）。

点投射光学测头光束位置矢量测量标定原理示意图见图 8－25。

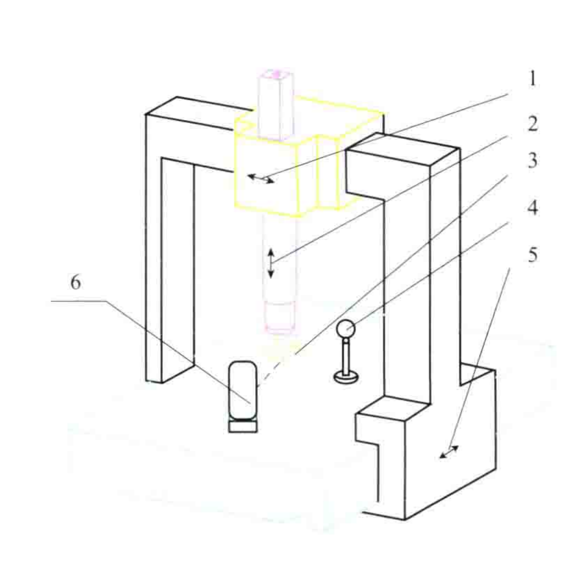


图 8－24　点投射光学测头坐标测量机工作原理示意图

1—Y 轴；2—Z 轴；3—光学测头；4—标准球；5—X 轴；6—工件

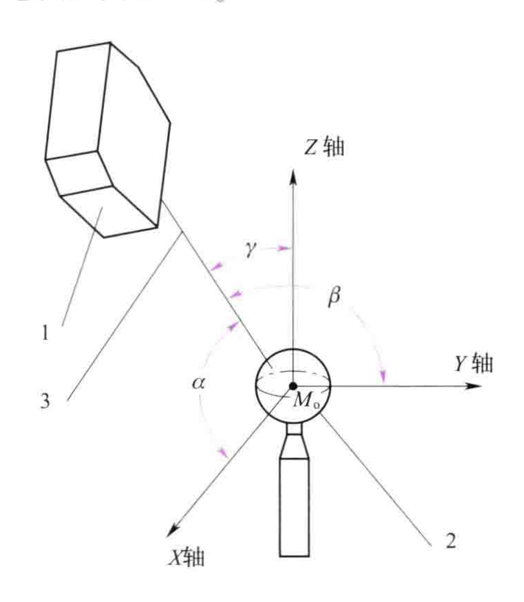


图 8－25　点投射光学测头光束位置矢量测量标定原理示意图

1—光学测头；2—标准球；3—光束直线

光学测头七点标定方法适用于直角坐标系测量机光学测头标定，也可用于具有直角坐标系的数控加工机床的光学测头标定。

近几年国外采用点投射光学测头的坐标测量机已经开发应用，包括德国和以色列等。国内采用点投射光学测头的坐标测量机尚在研究阶段，目前国内点投射光学测头光束矢量测量标定尚没有成熟完善的方法。

国内进行过另一种点投射光学测头光束方向测量标定方法研究，即采用平面角度块的测量标定方法；该方法采用两个互成一定夹角的平面作为测量基准；该方法原理是利用光束直线矢量与平面的空间几何关系，求解光束直线矢量信息；该方法采用的测量基准为平面，平面基准制造精度低，不易实现高精度的测量标定。拟采用的测量基准为标准球面，标准球面制造精度高，并且拟采用的七点球面坐标测量法，比前种方法使用简便，测量精度高。

光学测头七点标定法采用标准球表面七点坐标测量法，利用光束直线矢量与球面的空间几何关系，求解光学测头光束直线矢量信息；该方法优点是简便易行，测量精度高。本项研究给出了测量原理、方法、步骤和计算公式等。

8.5.2.1　光学测头七点标定的方法

点投射光学测头空间位置矢量的测量标定方法是，对具有直角坐标系的坐标测量系统（见图 8－24），采用点投射光学测头（3），测量标准球（4）表面，获取七个点的坐标值

和对应光点的光学测头读数值，利用测量数据建立光束直线矢量与标准球表面空间几何关系方程组，求解光学测头光束位置矢量信息。该方法的步骤是：

①在直角坐标系的测量机（见图 8-24）中放置一个标准球（4）；利用点投射光学测头（3）在标准球表面投射光点，获得七个光点位置的测量机坐标值和光学测头读数值；其中的前四个点（M_1、M_2、M_3、M_4）的坐标值为当光学测头读数值为某一相同值（设此值为 J_1）时的测量机坐标值，后三个点（M_5、M_6、M_7）的坐标值为当光学测头的读数值为另一个相同值（设此值为 J_2）时的测量机坐标值。

②利用光束直线矢量与标准球表面的空间几何关系建立方程组，利用步骤①的测量数据求解光束位置矢量。首先利用前四个点（M_1、M_2、M_3、M_4）测量数据，采用式（8-13）、式（8-16）、式（8-17）计算标准球球心坐标 M_0，获取光学测头光束零位坐标。再利用后三个点（M_5、M_6、M_7）测量数据，采用式（8-32）、式（8-33）、式（8-34）计算光束直线矢量方向与测量机运动轴线的夹角，即光束线与 X 轴的夹角 α、与 Y 轴的夹角 β 和与 Z 轴的夹角 γ（见图 8-25）。

8.5.2.2 光学测头七点标定测量方法

通过移动 X 轴、Y 轴和 Z 轴，利用点投射光学测头光束在标准球表面投射光点，获得七个光点的测量机坐标值和对应光点的光学测头读数值；其中前四个点（M_1、M_2、M_3、M_4）的坐标值为当光学测头读数值为某一相同值（设此值为 J_1）时的测量机坐标值，后三个点（M_5、M_6、M_7）的坐标值为光学测头的读数值为另一个相同值（设此值为 J_2）时的测量机坐标值。前四个点不能布置在一个平面上，后三个点不能布置在一条直线上。为了减小测量标定误差，这 7 个点尽量相互分离较大距离，并均匀布置在半球表面；测量中尽量将前四点的光学测头读数值 J_1 和后三点的光学测头读数值 J_2 相差较大数值。

8.5.2.3 光束位置矢量的计算方法

首先利用前四个点（M_1、M_2、M_3、M_4）测量结果计算标准球球心位置坐标 $M_0(x_0, y_0, z_0)$，获取光学测头光束零位坐标。再利用后三个点（M_5、M_6、M_7）测量结果，建立光束直线矢量与标准球球面的关系，得出光束直线矢量方向与测量机运动轴线的夹角，即与 X 轴的夹角 α、与 Y 轴的夹角 β 和与 Z 轴的夹角 γ。

前四点坐标为：$M_1(x_1, y_1, z_1)$、$M_2(x_2, y_2, z_2)$、$M_3(x_3, y_3, z_3)$、$M_4(x_4, y_4, z_4)$，此四点是光学测头读数值为 J_1 时的测量机四点坐标值。

设标准球球面半径为 R，根据球面方程可得到四个联立方程

$$(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 = R^2 \tag{8-3}$$

$$(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 = R^2 \tag{8-4}$$

$$(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 + (z_3 - z_0)^2 = R^2 \tag{8-5}$$

$$(x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 + (z_4 - z_0)^2 = R^2 \tag{8-6}$$

式（8-3）与式（8-4）展开相减得

$$(x_1^2 - x_2^2) - 2x_0(x_1 - x_2) + (y_1^2 - y_2^2) - 2y_0(y_1 - y_2) + (z_1^2 - z_2^2) - 2z_0(z_1 - z_2) = 0 \tag{8-7}$$

式（8-3）与式（8-5）展开相减得

$$(x_1^2 - x_3^2) - 2x_0(x_1 - x_3) + (y_1^2 - y_3^2) - 2y_0(y_1 - y_3) + (z_1^2 - z_3^2) - 2z_0(z_1 - z_3) = 0 \tag{8-8}$$

式（8－3）与式（8－6）展开相减得

$$(x_1^2 - x_4^2) - 2x_0(x_1 - x_4) + (y_1^2 - y_4^2) - 2y_0(y_1 - y_4) + (z_1^2 - z_4^2) - 2z_0(z_1 - z_4) = 0 \tag{8-9}$$

为简化计算表达，设参数表如下：

$I_1 = x_1 - x_2$	$I_2 = y_1 - y_2$	$I_3 = z_1 - z_2$	$I_4 = x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 + z_1^2 - z_2^2$
$I_5 = x_1 - x_3$	$I_6 = y_1 - y_3$	$I_7 = z_1 - z_3$	$I_8 = x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 + z_1^2 - z_3^2$
$I_9 = x_1 - x_4$	$I_{10} = y_1 - y_4$	$I_{11} = z_1 - z_4$	$I_{12} = x_1^2 - x_4^2 + y_1^2 - y_4^2 + z_1^2 - z_4^2$

从而得到三个方程组

$$2I_1x_0 + 2I_2y_0 + 2I_3z_0 = I_4 \tag{8-10}$$

$$2I_5x_0 + 2I_6y_0 + 2I_7z_0 = I_8 \tag{8-11}$$

$$2I_9x_0 + 2I_{10}y_0 + 2I_{11}z_0 = I_{12} \tag{8-12}$$

由式（8－12）有

$$z_0 = (I_{12} - 2I_9x_0 - 2I_{10}y_0)/(2I_{11}) \tag{8-13}$$

将式（8－13）带入式（8－10）、式（8－11）有

$$x_0(2I_1I_{11} - 2I_3I_9) + y_0(2I_2I_{11} - 2I_3I_{10}) = I_4I_{11} - I_3I_{12} \tag{8-14}$$

$$x_0(2I_5I_{11} - 2I_7I_9) + y_0(2I_6I_{11} - 2I_7I_{10}) = I_8I_{11} - I_7I_{12} \tag{8-15}$$

为简化计算表达，设参数表如下：

$k_1 = 2I_1I_{11} - 2I_3I_9$	$k_2 = 2I_2I_{11} - 2I_3I_{10}$	$k_3 = I_4I_{11} - I_3I_{12}$
$k_4 = 2I_5I_{11} - 2I_7I_9$	$k_5 = 2I_6I_{11} - 2I_7I_{10}$	$k_6 = I_8I_{11} - I_7I_{12}$

并解式（8－14）和式（8－15）可得到

$$y_0 = (k_6 - k_4x_0)/k_5 \tag{8-16}$$

$$x_0 = (k_3k_5 - k_3k_4)/(k_1k_5 - k_2k_4) \tag{8-17}$$

从式（8－13）、式（8－16）、式（8－17）可以求得球心坐标 M_0（x_0，y_0，z_0），从而建立光学测头光束矢量零位坐标，即确定标准球球心为测量机通用坐标系坐标原点，光学测头读数值为 J_1 时设定为测头光束矢量零位位置。

后三点坐标为：$M_5(x_5,\ y_5,\ z_5)$、$M_6(x_6,\ y_6,\ z_6)$、$M_7(x_7,\ y_7,\ z_7)$，该三点是通过运动测量机坐标轴，改变光学测头读数值获得；后三点坐标是光学测头读数值为另一个相同值 J_2 时取得的三点测量机坐标值。

设：$J = J_2 - J_1$

光束矢量长度（模值）变动 J（即光学测头读数值变动量）后，此时光束直线与标准球表面的交点坐标 $M(x,\ y,\ z)$ 满足关系式

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2 \tag{8-18}$$

同时，光束直线矢量方向角为 α、β、γ，长度为 J 且过空间点 $M_i(x_i,\ y_i,\ z_i)$ 的直线方程可以表示为

$$x = x_i + J\cos\alpha \tag{8-19}$$

$$y = y_i + J\cos\beta \tag{8-20}$$

$$z = z_i + J\cos\gamma \tag{8-21}$$

测头光束直线过点 $M_5(x_5, y_5, z_5)$、$M_6(x_6, y_6, z_6)$、$M_7(x_7, y_7, z_7)$，可以得到方程组

$$(x_5 + J\cos\alpha - x_0)^2 + (y_5 + J\cos\beta - y_0)^2 + (z_5 + J\cos\gamma - z_0)^2 = R^2 \tag{8-22}$$

$$(x_6 + J\cos\alpha - x_0)^2 + (y_6 + J\cos\beta - y_0)^2 + (z_6 + J\cos\gamma - z_0)^2 = R^2 \tag{8-23}$$

$$(x_7 + J\cos\alpha - x_0)^2 + (y_7 + J\cos\beta - y_0)^2 + (z_7 + J\cos\gamma - z_0)^2 = R^2 \tag{8-24}$$

为简化计算表达，设参数表如下：

$L_1 = x_5 - x_0$	$L_2 = y_5 - y_0$	$L_3 = z_5 - z_0$
$L_4 = x_6 - x_0$	$L_5 = y_6 - y_0$	$L_6 = z_6 - z_0$
$L_7 = x_7 - x_0$	$L_8 = y_7 - y_0$	$L_9 = z_7 - z_0$

空间直线方向角 α、β、γ 满足关系式

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1 \tag{8-25}$$

式（8－22）～式（8－24）展开并利用式（8－25）简化得到方程组

$$L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 + 2J(L_1\cos\alpha + L_2\cos\beta + L_3\cos\gamma) + J^2 = R^2 \tag{8-26}$$

$$L_4^2 + L_5^2 + L_6{}^2 + 2J(L_4\cos\alpha + L_5\cos\beta + L_6\cos\gamma) + J^2 = R^2 \tag{8-27}$$

$$L_7^2 + L_8^2 + L_9^2 + 2J(L_7\cos\alpha + L_8\cos\beta + L_9\cos\gamma) + J^2 = R^2 \tag{8-28}$$

为简化计算表达，设参数表如下：

$H_1 = L_1^2 + L_2^2 + L_3^2$	$H_2 = L_4^2 + L_5^2 + L_6{}^2$	$H_3 = L_7^2 + L_8^2 + L_9^2$
$M = R^2 - J^2$		
$N_1 = (M - H_1)/(2J)$	$N_2 = (M - H_2)/(2J)$	$N_3 = (M - H_3)/(2J)$

得到方程组

$$L_1\cos\alpha + L_2\cos\beta + L_3\cos\gamma = N_1 \tag{8-29}$$

$$L_4\cos\alpha + L_5\cos\beta + L_6\cos\gamma = N_2 \tag{8-30}$$

$$L_7\cos\alpha + L_8\cos\beta + L_9\cos\gamma = N_3 \tag{8-31}$$

解上述方程组，为简化计算表达，设参数表如下：

$M_1 = L_1L_9 - L_3L_7$	$M_2 = L_2L_9 - L_3L_8$	$M_3 = N_1L_9 - N_3L_3$
$M_4 = L_4L_9 - L_6L_7$	$M_5 = L_5L_9 - L_6L_8$	$M_6 = N_2L_9 - N_3L_6$

解得方向角 α、β、γ 表达式

$$\cos\gamma = (N_3 - L_7\cos\alpha - L_8\cos\beta)/L_9 \tag{8-32}$$

$$\cos\beta = (M_6 - M_4\cos\alpha)/M_5 \tag{8-33}$$

$$\cos\alpha = (M_3M_5 - M_2M_6)/(M_1M_5 - M_2M_4) \tag{8-34}$$

用式（8-32）~式（8-34）可以求得 α、β、γ，即测头光束直线与测量机 X 轴的夹角 α、与 Y 轴的夹角 β 和与 Z 轴的夹角 γ。

8.5.2.4　光学测头七点标定方法的优点

采用测量标准球的七点坐标测量标定方法，即在直角坐标系的测量机上，用点投射光学测头测量标准球，在标准球表面获取七个光点的测量机坐标值和对应光点的光学测头读数值，通过公式计算即可完成测量标定；该方法操作简单，测量速度快，计算方法简便、易于实现。

七点标准球测量标定法使用的标定工具（标准球）简单，容易获得高的制造精度，成本低，测量精度高。本标定方法采用测量方法简便易行，计算公式表达清晰明确，易于操作实现。

本方法适用于采用点投射光学测头的具有直角坐标系的各种坐标测量机，也可用于具有直角坐标系的数控加工机床的光学测头的测量标定。

8.5.3　七点标定法试验研究

在使用七点标定法标定三角法测头的光束方向时，七个位置三角法测头在标准球上的光斑位置范围大小和三角法测头七个读数值的精度直接影响标定三角法测头光束方向的精度。通过手柄移动测量机 X、Y、Z 轴的方式，很难将光斑所在球上的范围平均化、最大化，也很难获得较好的三角法测头读数值（即前四点光学测头读数相同，后三点光学测头读数相同），而且用手柄控制测量机进行标定的方式不但效率低，而且精度较差，所以只有建立自动标定模型进行自动标定的方式才能得到最大的光斑所占区域范围和准确的七个测头读数值，从而达到快速标定和高精度标定的目的。

在标定的过程中：首先，通过手动控制测量机得到三角法测头存在一定误差的七个测量机的坐标值，通过计算可以得到测头光轴的矢量方向、标准球的球心坐标和标准球半径；然后，基于手动标定的结果建立简易数学模型进行自动标定。三角法测头自动标定模型流程如图 8-26 所示。

图 8-26 中设置测头读数值的目的是取到光学测头测量范围的最大值。和“共轭对”法标定的原理一样，七点法标定也可以看做是确定读数值不同的两个球的球心之后，用球心连线的方向表示光轴方向。因此，以测量范围为 40~60mm 的米铱 IDX1700 测头为例，只有前四点测头读数值为 40mm，后三点测头读数值为 60mm，才能够得到最准确的三角法测头光轴方向；设置标定范围角度的目的是使光斑在标准球上范围最大化，由于三角法测头角度特性的影响，为了保证足够的测量结果，光斑的覆盖范围不能超过三角法测头角度特性（详见 8.6 节）良好的角度范围，再加上所使用的三角法测头均为单目（只有一个 CCD 屏幕）测头，空间接受漫反射的角度不是完全对称的，因此需要在标定的过程中，寻找并设定能够完成标定的最大范围，而在手动标定之后的第一次自动标定过程中，由于手动标定的误差较大，需要将这一参数设定得小一些，以防止三角法测头不能够读取测量数据，在之后的自动标定过程中再逐渐增大标定范围角度；设置测量机速度的目的是通过移动测量机调整光学测头的读数值符合设定的读数值范围（通常为标准值 ±1μm）。

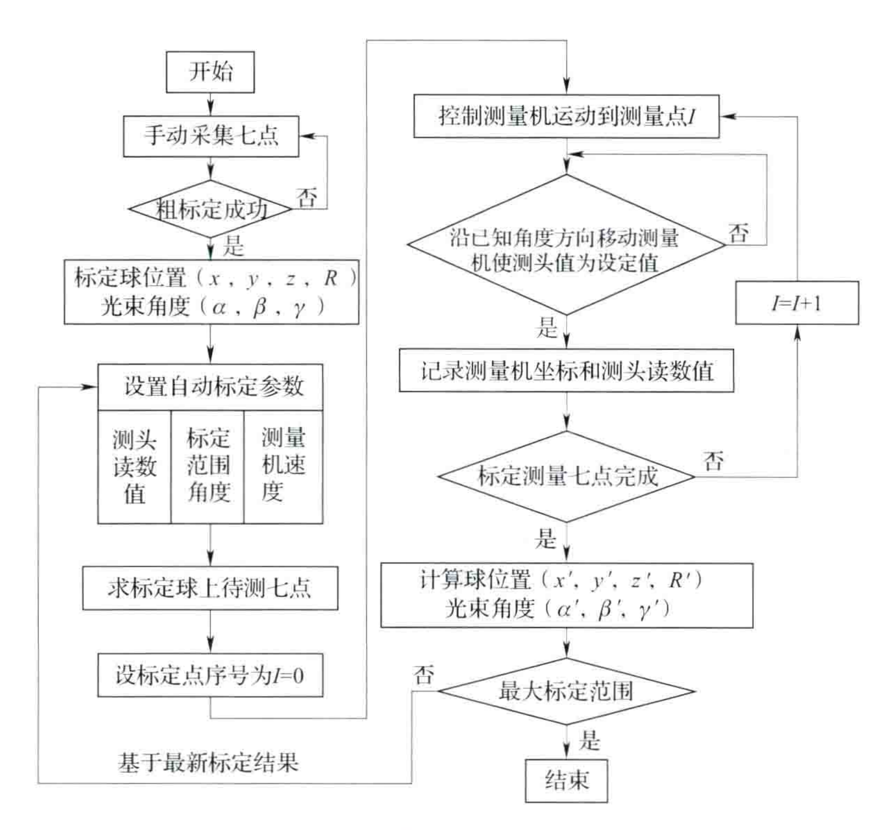


图 8－26　三角法测头自动标定模型

建立模型进行自动标定的关键在于如何求取标准球上的七点位置坐标。为了得到球面上七个点的坐标，本文做了简化，仅求四个点就可以满足标定要求，通过前四点和后三点测头读数值不同来最终获得七个测量机坐标值。图 8－27 是球面上四点位置示意图。

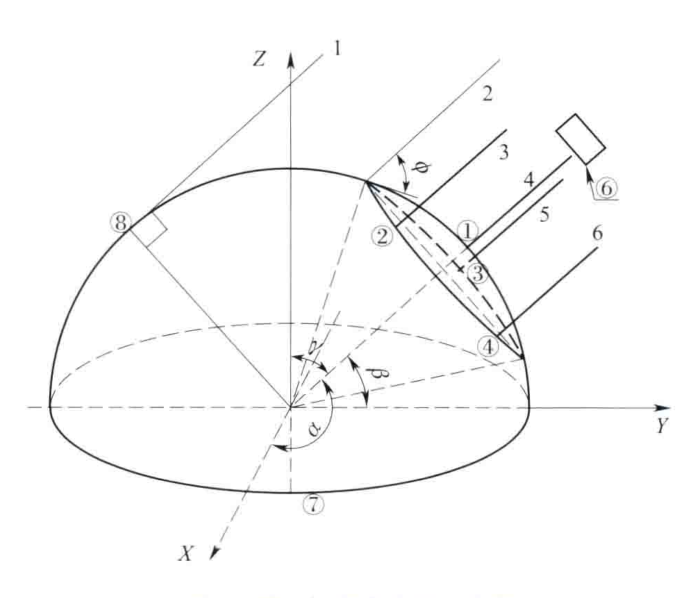


图 8－27　标定点位置示意图

其中，⑦表示标准球；⑥表示三角法测头；1，2，3，4，5，6 是测头光束；①，②，③，④表示标准球球面上的四个点，①是顶点，②，③，④位于垂直于光束方向的截面圆

上且均匀分布；α，β，γ 表示三角法测头光轴与 X，Y，Z 各轴的夹角；ϕ 表示光轴与球面切线的夹角；⑧表示标定三角法测头的最大范围的理论点。

下面，依次求取自动标定模型的四个位置点坐标。手动标定结果：标准球的球心坐标（x_0，y_0，z_0）、半径 r 和三角法测头光轴的方向 α，β，γ。首先，将标准球平移到坐标原点（即 $x_0=y_0=z_0=0$）；然后，设①，②，③，④的坐标分别为（x_1，y_1，z_1），（x_2，y_2，z_2），（x_3，y_3，z_3），（x_4，y_4，z_4）。

由标定结果和假设条件，得①点坐标如下

$$x_1 = r\cos\alpha \tag{8-35}$$

$$y_1 = r\cos\beta \tag{8-36}$$

$$z_1 = r\cos\gamma \tag{8-37}$$

应用三维空间坐标旋转方法求取②，③，④点坐标。由①点绕 X，Y，Z 坐标轴某一轴旋转可得②点。通过 α，β，γ 角来确定坐标旋转轴，再确定绕坐标轴的旋转角度。以绕 X 轴为例，求取旋转角度。图 8－28 为①点和②点的空间关系图。

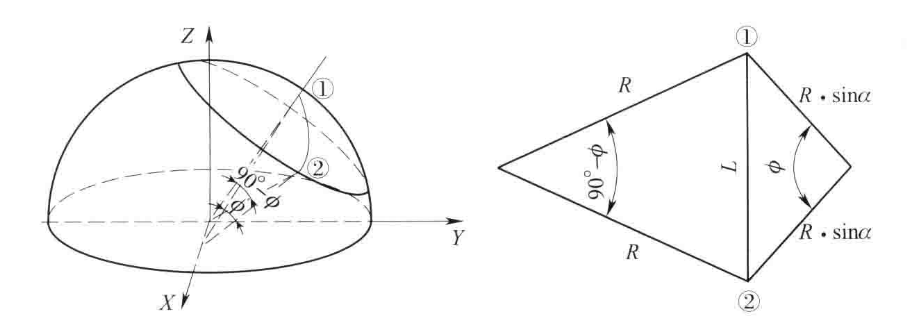


图 8－28　①点和②点的空间关系图

其中，绕 X 轴旋转的角度 φ 具有图 8－28 中右图所示几何关系。由余弦定理，得绕 X 轴旋转的旋转角

$$\varphi = \arccos\left(1 - \frac{1}{(\sin\alpha)^2} + \frac{\sin\phi}{(\sin\alpha)^2}\right) \tag{8-38}$$

将 φ 代入坐标旋转矩阵，可得②点坐标

$$(x_2, y_2, z_2) = (x_1, y_1, z_1)\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_\varphi & -\sin\theta_\varphi \\ 0 & \sin\theta_\varphi & \cos\theta_\varphi \end{bmatrix} \tag{8-39}$$

求③点：单位旋转轴为 $\boldsymbol{A}=[\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma]$，由旋转矩阵可得第三点坐标

$$(x_3, y_3, z_3) = (x_2, y_2, z_2)\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \tag{8-40}$$

其中

$$m_{11} = \cos\theta + (1-\cos\theta)\cos^2\alpha \tag{8-41}$$

$$m_{22} = \cos\theta + (1-\cos\theta)\cos^2\beta \tag{8-42}$$

$$m_{33} = \cos\theta + (1-\cos\theta)\cos^2\gamma \tag{8-43}$$

$$m_{12} = (1 - \cos\theta)\cos\beta\cos\alpha + \sin\theta\cos\gamma \quad (8-44)$$

$$m_{13} = (1 - \cos\theta)\cos\beta\cos\alpha - \sin\theta\cos\gamma \quad (8-45)$$

$$m_{21} = (1 - \cos\theta)\cos\alpha\cos\beta - \sin\theta\cos\gamma \quad (8-46)$$

$$m_{23} = (1 - \cos\theta)\cos\gamma\cos\beta + \sin\theta\cos\alpha \quad (8-47)$$

$$m_{31} = (1 - \cos\theta)\cos\gamma\cos\alpha + \sin\theta\cos\beta \quad (8-48)$$

$$m_{32} = (1 - \cos\theta)\cos\gamma\cos\beta - \sin\theta\cos\alpha \quad (8-49)$$

同理可得④点坐标（x_4，y_4，z_4）。

标准球上四点求得之后，进行空间平移就可以应用在测量机坐标系中，自动控制测量机移动，自动控制测量机调整光学测头值，最终完成自动标定过程。

8.5.4　七点标定法的误差分析

选用米铱 IDX1700 测头和 OPTEX 测头分别进行不同角度下的标定试验和单一角度下的标定重复度试验。在不同角度下，均能够得到标定结果，仅当三角法测头光轴方向与三个坐标轴中任意一个夹角较小时，可能出现标定异常的现象，这是由于采集数据的时候存在误差，导致计算得到的方向余弦大于 1，从而出现报错的情况。后通过软件算法，将这一情况排除。

在进行两种三角法测头标定重复性的试验过程中，我们分别使用两种三角法测头，分别在一个角度下，进行 25 组重复性试验，重复性试验要求如下：

①每一组重复标定试验均基于上一组标定得到的球心坐标和光轴角度；

②每一组重复标定试验数据均是在自动标定 2 次之后才开始采集，防止前两次自动标定实验由于手动标定误差较大而带来较差的稳定性；

③在每个测头的标定重复性试验过程中的参数设定相同，均为 55°标定范围角度，3mm/s 测量速度，米铱测头选用 44mm 和 56mm 两个读数值，Optex 测头选用 88mm 和 102mm 两个读数值。

在对数据进行分析处理之后，得到试验结果如图 8－29 所示。

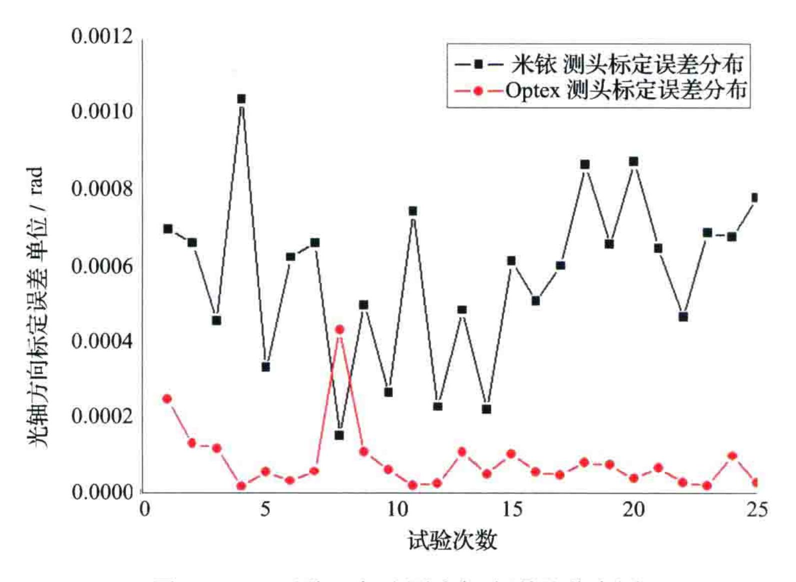


图 8－29　两种三角法测头标定误差分布图

由图 8-29 数据经过数据分析处理之后可以得出以下结论：在使用 Optex 测头进行标定的过程中，测头的标定离散程度较小，$3\sigma < 0.016°$，而米铱测头的离散程度较大，$3\sigma < 0.08°$。

根据测头光轴方向的误差分析，如图 8-30 所示，光轴方向误差带来的测量误差还与测量过程中光学测头的读数值变化量有关。根据上图关系可知，在二维空间内，光轴方向标定误差带来的两点相对位置关系变化可以表示为

$$\overline{AB} - \overline{A'B'} = (l_1 - l_2)\cos\theta$$

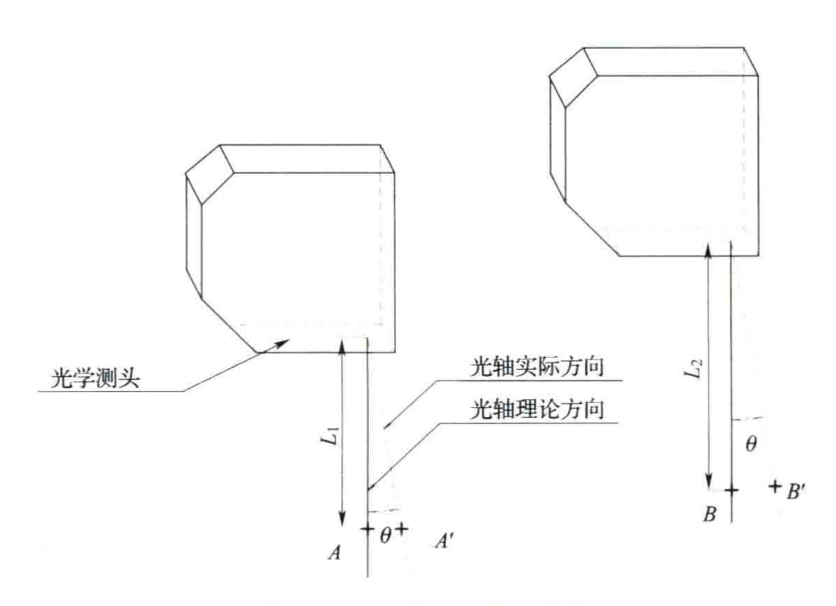


图 8-30　标定误差影响模型

将二维问题转化为三维问题，$\cos\theta$ 所表示的也就是光轴方向的方向向量（$\cos\alpha$，$\cos\beta$，$\cos\gamma$）。因此，轨迹规划的精确程度直接影响光轴方向的标定误差对测量误差的影响。轨迹规划后测头的读数值变化越小，测头标定误差带来的测量误差越小。

当测头读数值变化为 1mm 时，两种三角法测头光轴方向的标定误差带来的测量误差分别小于 0.288μm 和 1.44μm。在轨迹规划的过程中，可以通过增加轨迹控制点的方式缩小测头读数值的变化量。

由此可见，两种测头使用七点标定法得到的光轴方向精度均可以满足光学坐标测量系统的使用要求。

8.5.5　单一角度测量试验

在单一角度下进行重复标定试验只能够获得算法的稳定性，而不能够保证算法的正确性。如果标定的光轴方向与实际光轴方向存在误差，在测量的过程中会对测量结果产生影响。

通过在单一角度下对标准球进行测量，并采用 Rational DMIS 软件对测量数据进行拟合，得到使用两种型号的三角法测头的光学坐标测量系统的测量精度。在测量标准球的过程中，我们分别选取略小于三角法测头能够准确取数的最大角度范围的截圆，在这截圆上均布四点，并在这四点沿切线方向扫描测量 5mm 的一段长度，并在这一光轴方向通过球

心时，在标准球上的光斑点附近，扫描测量一组“十”字线。两种测头多次测量直径49.973mm的标准球如图8－31所示。

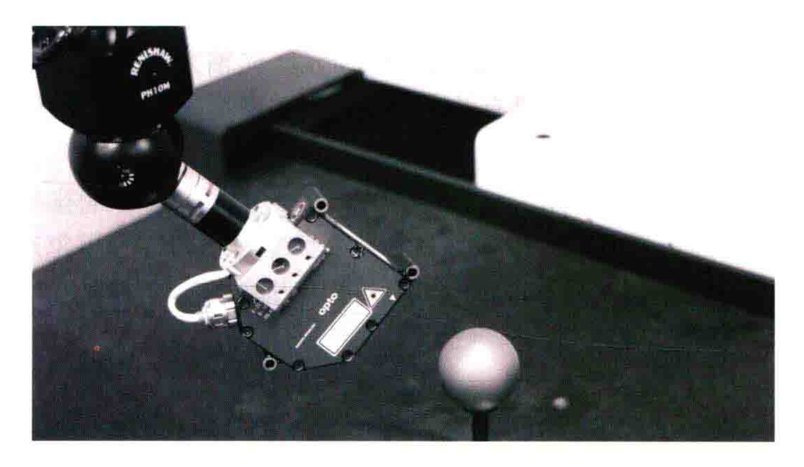


图8－31 单一角度标准球测量试验

经过10组测量试验，得到的标准球的误差如表8－2所示。

表8－2 单一角度标准球测量误差

序号	球心坐标	直径/mm	球心偏差/mm	直径误差/mm
1	(538.6729 364.5297 －393.9008)	49.9682	0.003828	0.00079
2	(538.6746 364.5331 －393.8977)	49.9639	0.00203	－0.00351
3	(538.6728 364.5304 －393.9007)	49.969	0.003174	0.00159
4	(538.6758 364.5329 －393.897)	49.964	0.003401	－0.00341
5	(538.6729 364.5327 －393.899)	49.9667	0.000512	－0.00071
6	(538.673 364.5327 －393.8981)	49.9674	0.001159	－0.00001
7	(538.6753 364.5365 －393.8959)	49.9618	0.005133	－0.00561
8	(538.6732 364.5343 －393.8999)	49.9679	0.001407	0.00049
9	(538.6714 364.534 －393.8992)	49.9686	0.001956	0.00119
10	(538.6696 364.5351 －393.9029)	49.9766	0.005547	0.00919

通过试验结果显示，米铱测头在单一角度下测量的球心误差小于6μm，直径误差小于10μm。由此可以看出，我们使用七点标定法可以得到正确的光轴方向。

8.6 光学测头的角度特性和粗糙度特性试验研究

光学测头是光学坐标测量系统的核心部件，其选型对测量精度有直接的影响。因此，在进行光学测头选择的过程中，充分考虑了各种光学测头的精度、工作距离、工作范围以及价格等因素。

目前，较常见的光学测头从原理上区分主要有三角法测头、锥光偏振测头和光谱共焦

法测头等。三角法测头拥有较大的工作距离，在测量的过程中不容易发生碰撞，对开敞性较差的零件也能够利用其工作距离的优势进行扫描测量；其较大的量程范围为七点标定法带来了较高的光轴方向标定精度，同样高的标定精度也使得在测量的过程中可以充分利用三角法测头量程大的优势，减小轨迹规划点的密度，大大提高了扫描测量的效率，减小了轨迹规划的工作量和工作难度；其相对低的价格更使其成为光学坐标测量系统中光学测头的首选。而锥光偏振测头的重量与三角法测头相比要重很多，将锥光偏振测头安装在 PH10M 测头座上可能会超过 PH10M 测头座的最大推荐扭矩，但锥光偏振测头在精度上要优于三角法测头。

选取典型测头：米铱 ILD1700 – 20 点激光三角法测头、Optex CD5 – 85 点激光三角法测头和 ConoProbe Mark Ⅲ – HD50T 锥光偏振测头作为光学扫描坐标测量设备的备选光学测头，主要参数如表 8 – 3 所示。

表 8 – 3　光学测头主要参数

型号	ILD1700 – 20	Optex CD5 – 85	ConoProbe Mark Ⅲ – HD50T
工作原理	激光三角法	激光三角法	锥光偏振法
工作距离/mm	50	85	40
工作范围/mm	±10	±20	±2
线性度	±0.08%	±0.05%	0.1%
精度/μm	1.5	1	<2

目前市场上常见的光学测头均为光学位移传感器，即光学测头的相关参数是在被测物体沿光学测头的光束方向运动时的测量被测物体相对位移的精度。在使用光学位移传感器作为光学坐标测量系统的光学测头时，一般不会在这种工作条件下进行测量。因此，需要针对光学坐标测量系统的使用条件，重新检验这三种光学测头的精度，在此基础上，再综合工作距离、工作范围等因素，确定光学坐标测量系统的测头选择。

8.6.1　光学测头角度特性试验

基于三角法测头的测量原理表明，被测表面的倾斜（即入射角）以及被测表面的粗糙度、曲率以及颜色等因素，对测量准确度有很大影响。所以三角法测头在进行非接触精密测量的过程中，需要注意的因素较多，使用条件比较苛刻。随着三角法测头产品的逐步完善，近年来三角法测头的性能参数较十年之前已有了长足进展，现阶段三角法测头能否满足大批量生产过程中的检测使用要求，需要通过试验来进行充分验证，而锥光偏振测头是否存在同样的角度特性和粗糙度特性也需要通过试验来检验。

8.6.1.1　试验模型与试验平台的建立及调整

为了掌握三角法测头的角度特性，并进行重复试验进行验证，可利用圆度仪，建立试验平台，如图 8 – 32 所示。

使用圆度仪找平并垫起后的平面作为试验基准面，并将表面质量和精度均较高的被测基准零件放置在基准面上，保证基准件的被测表面与圆度仪回转工作台的回转轴线平行。将三角法测头装在一维运动平台上，同时使用精密平口钳固定一维运动平台，使其只能通

过转动旋钮进行一维运动。移动平口钳使得三角法测头的光斑照射在基准零件的被测表面上，且传感器能读出数值。当三角法测头的光束通过圆度仪工作台的回转中心时，其转动时在三角法测头的量程范围内转动会使得测头的读数值形成对称曲线。通过这种原理，将三角法测头的光束方向调整到通过形位误差测量仪的回转轴线。由于当被测表面通过圆度仪的回转轴线时，轴线上的点线速度为零，使用千分表监控，调整被测基准件使其被测表面通过形位公差测量仪的回转轴线。试验系统的理论误差模型如图 8 – 33 所示。

图 8 – 33 中，当被测表面和三角法测头的光轴分别到形位公差测量仪的回转轴线分别存在误差 Δx 和 Δy，转台转角 θ 时，三角法测头的读数值理论上会存在误差 δ。

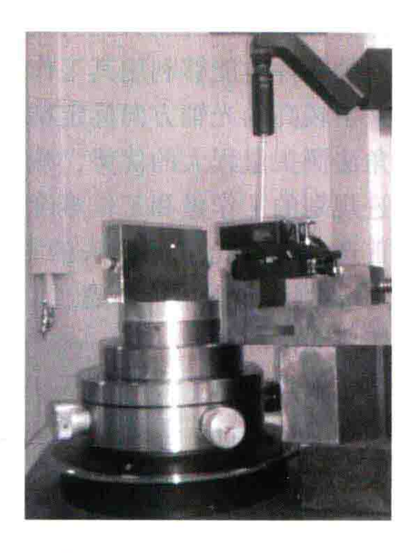


图 8 – 32　角度特性试验图

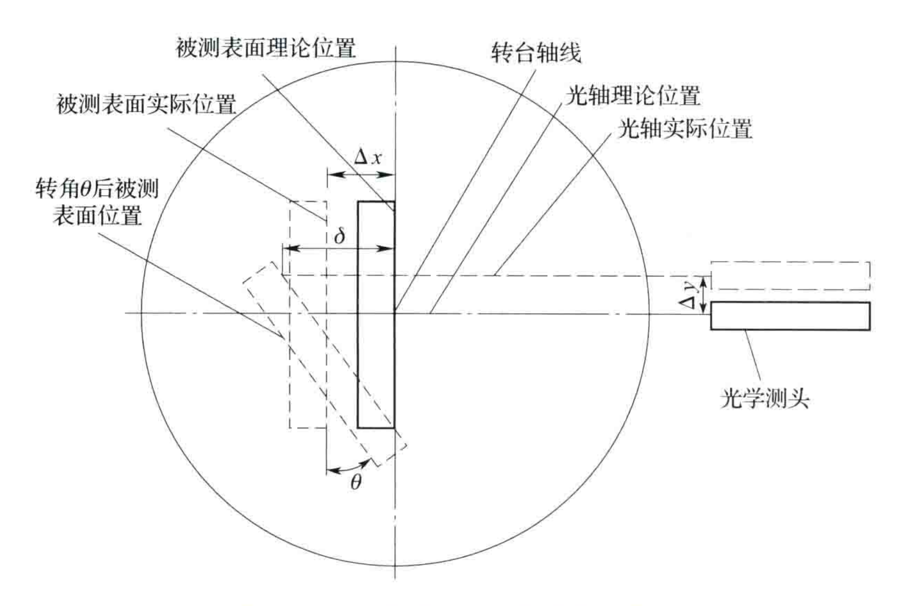


图 8 – 33　角度特性试验理论误差模型

$$\delta = \Delta y \tan\theta + \frac{\Delta x}{\cos\theta} \tag{8-50}$$

试验过程中，千分表的示值精度为 1μm，可以将 Δx 误差控制在 1μm 以内，而同样使用千分表进行一维运动平台微动监视的情况下，Δy 对系统的影响也很小，因此试验可以真实反映三角法测头的角度特性。

8.6.1.2　试验过程和试验数据分析

在试验的过程中，使用圆度仪控制转台在两种三角法测头的量程范围内进行回转，通过三角法测头的连续扫描功能获得连续的测量数据。两个测头的试验数据如图 8 – 34 所示。

通过对两个测头角度特性的实验结果可以看出，在入射角小于 60°时，由于角度特性带来的三角法测头读数值误差对测量结果影响不大。

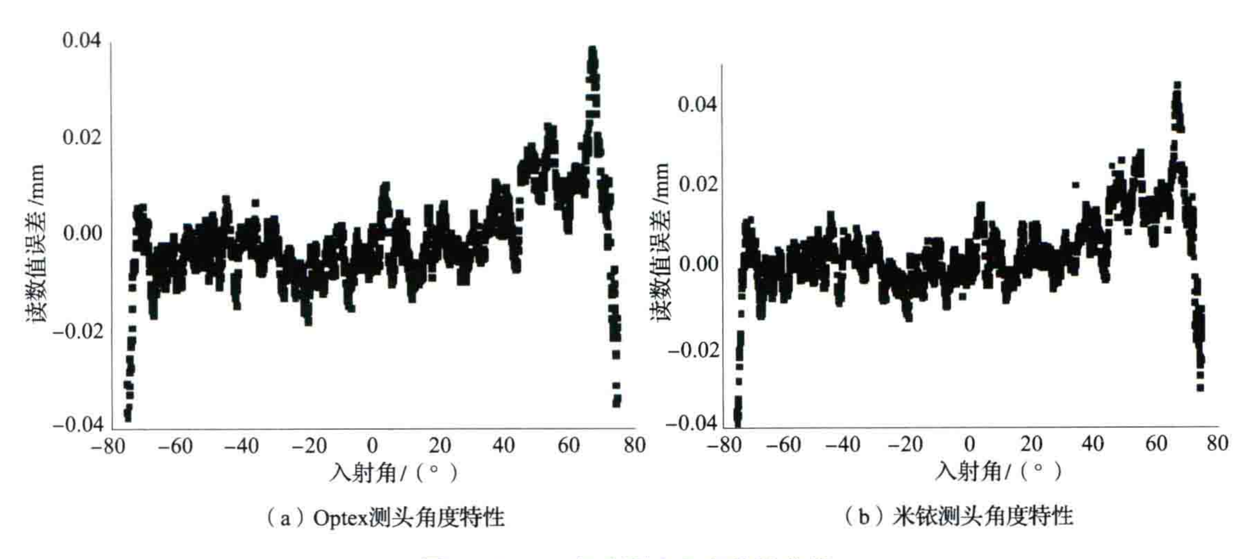


图 8－34　三角法测头角度特性曲线

同时，对 ConoProbe Mark Ⅲ－HD50T 型锥光偏振测头的角度特性也进行了试验，其角度特性试验数据如图 8－35 所示。

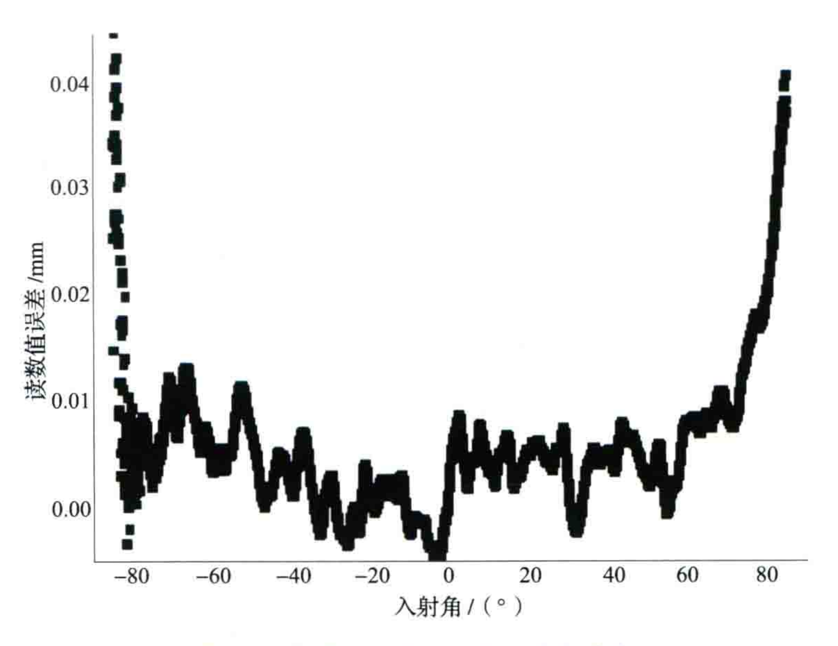


图 8－35　锥光偏振测头角度特性曲线

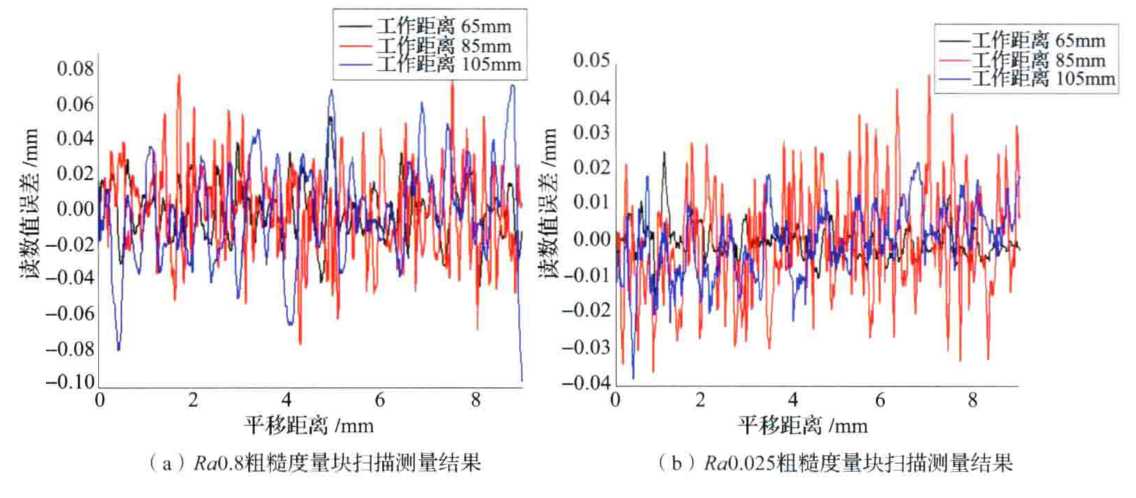
通过试验数据显示，锥光偏振测头同样存在角度特性，在 60°的范围内，测头的角度特性影响不大。

对于 7.5°细分的 PH10M 测头座来说，可以标定的角度之间夹角不会大于 7.5°，而在这个范围内各种测头的角度特性对测量精度的影响均可以忽略。

8.6.2　光学测头粗糙度特性测试试验

在进行角度特性试验的过程中，通过角度特性曲线中的不规则的锯齿波也可以发现光学测头在扫描测量的过程中，会由于其粗糙度特性而产生较大的测量误差。为了进一步掌

握三角法测头粗糙度特性，将标准粗糙度量块放置在水平导轨上进行水平移动来模拟三角法测头在扫描测量时的工作状态。由于粗糙度量块具有额定的表面粗糙度 *Ra* 值，可以获得在不同表面粗糙度的情况下，三角法测头扫描测量时的测量精度。首先使用 Optex CD5 - 85 测头对 *Ra*0.8 和 *Ra*0.025 的粗糙度量块分别在测头读数值为 65mm、85mm、105mm 附近进行扫描测量，得到测头在工作距离极限和工作距离中间位置的扫描测量结果如图 8 - 36 所示。



（a）*Ra*0.8粗糙度量块扫描测量结果　　（b）*Ra*0.025粗糙度量块扫描测量结果

图 8 - 36　Optex CD5 - 85 测头粗糙度特性试验数据

图 8 - 36（a）为 Optex CD5 - 85 测头分别在 105mm、85mm、65mm 三个读数值左右对 *Ra*0.8 的粗糙度量块进行扫描测量得到的实验数据，图 8 - 36（b）是测头对 *Ra*0.025 的粗糙度量块所做的同种试验。通过多次扫描测量，此结果所反应的测头在不同工作距离对不同表面粗糙度的测量误差结果具有重复性。通过实验过程中的观察和对试验数据的分析对比可以发现：

①试验结果中的每一个波峰波谷均可以通过手动平移水平导轨一对一的获得（即每个波峰波谷均真实可信，并非信号干扰造成的误差）；

②当测头处于极限工作距离时（测头读数值为 65mm 或 105mm 左右），激光束的光斑较大，测头读数值的误差稍小但误差不稳定；

③当测头处于中间工作距离时（测头读数值为 85mm 左右），激光束的光斑较小，测头读数值的误差稍大但误差波动稳定。

试验中所用的两种标准粗糙度量块（*Ra*0.8 和 *Ra*0.025）如图 8 - 37 所示。

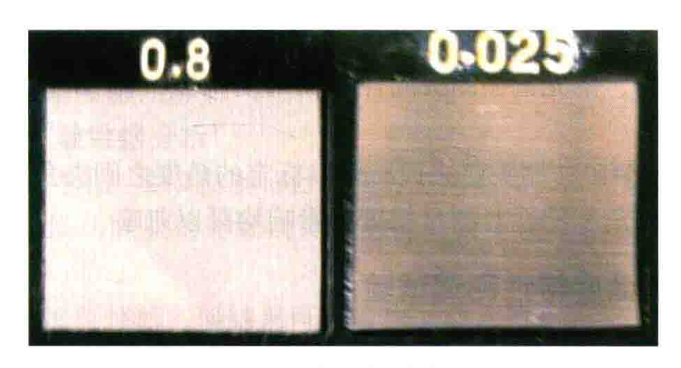


图 8 - 37　标准粗糙度量块

其中 $Ra0.8$ 粗糙度量块的加工痕迹比较明显，多次试验的结果均表明加工痕迹可以和得到的扫描测量结果一一对应。可以认为粗糙度特性的影响不会覆盖表面形貌的变化。通过 Matlab 软件对所得到的具有较稳定误差波动的中间工作距离状态下的测头数据进行傅里叶变换，得到其频域数据结果，也可以得到同样的结论。

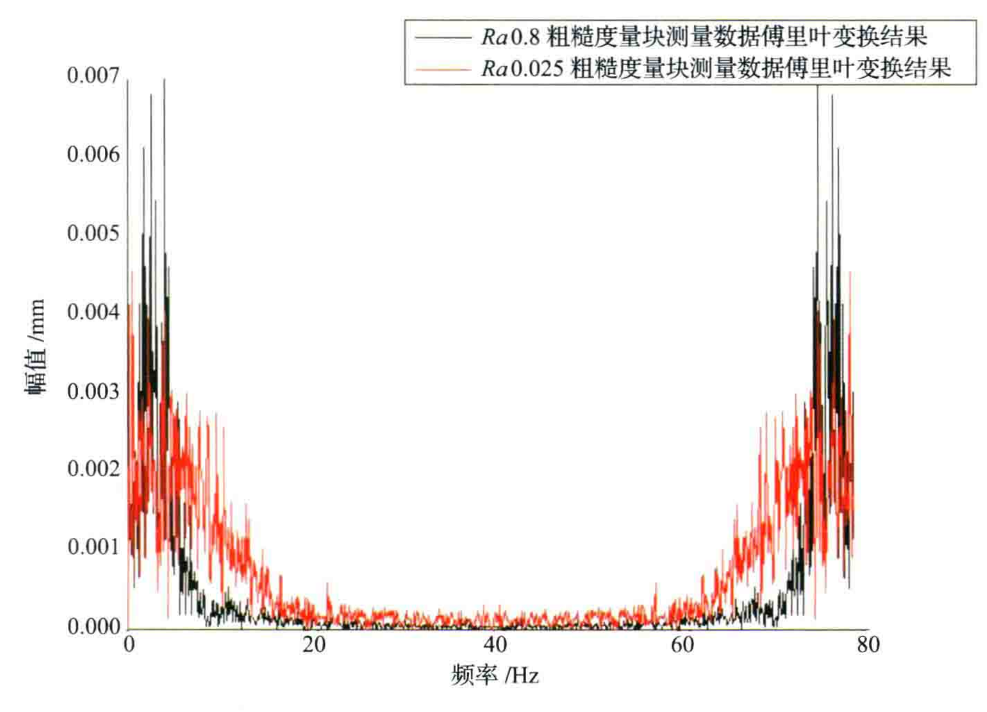


图 8－38　表面粗糙度特性傅里叶变换

由上图结果可以看出：

①当三角法测头进行扫描测量时，由于其漫反射原理，会产生很大的测量误差，误差主要集中在 0～20Hz 和 60～80Hz 区域；

②低频率对应的测量长度对应被测粗糙度量块的加工痕迹，其误差表现为大范围内的尺寸变化，可以看作是加工形貌的影响即被测表面真实尺寸；

③高频率对应的测量长度与该工作距离下测头的光斑大小相当，反映了光斑完全离开某一位置后测头的读数值发生的变化量即测头的粗糙度特性；

④通过将低频率范围内的幅值与全频率范围内的幅值求积分发现，低频率范围内的幅值只占全频率范围内的幅值的三分之一。

在生产过程中为了能够获得较高的测量精度，巨大的测量误差需要进行补偿或消除，否则无法满足叶片测量的精度要求。通过对米铱 ILD1700－20 测头进行同样的试验，也发现相同的测量结果。在工作距离 50mm（工作距离中间位置）时，米铱 ILD1700－20 测头扫描测量 $Ra0.8$ 和 $Ra0.025$ 粗糙度量块得到的数据如图 8－39 所示。

通过试验可以看出：

①米铱 ILD1700－20 测头因粗糙度带来的测量误差小于 Optex CD5－85 测头；

②米铱 ILD1700－20 测头同样需要根据傅里叶变换结果的结果进行优化处理，消除粗糙度特性带来的误差。

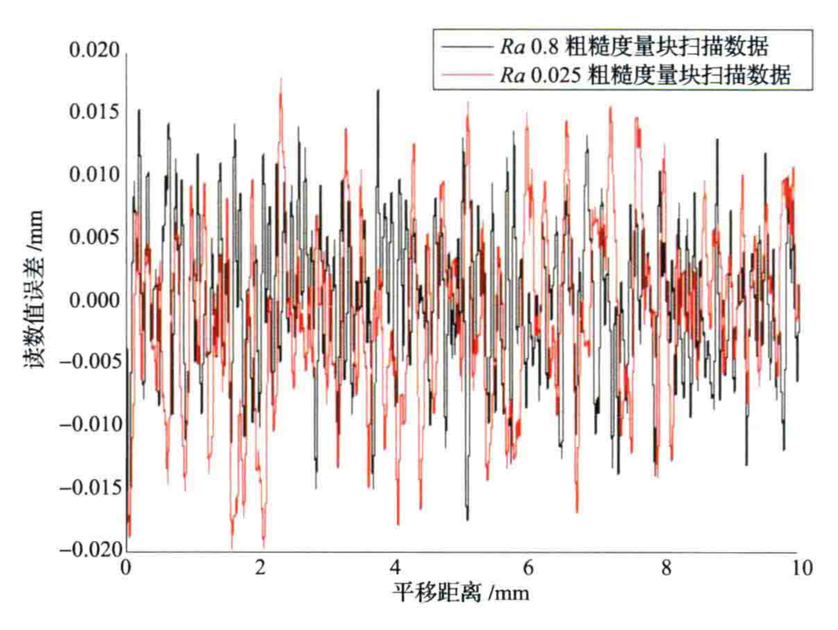


图 8－39　米铱 ILD1700－20 测头粗糙度特性

ConoProbe Mark Ⅲ－HD50T 型锥光偏振测头，得到其粗糙度特性带来的扫描误差在 ±0.01mm，已经达到微米级，可以满足光学坐标测量系统的使用要求。但其工作距离限制，标定精度会有所降低，而其重量和尺寸可能会超过 PH10M 测头座的许可扭矩。因而如果能够通过算法优化，降低三角法测头由粗糙度特性带来的误差，三角法测头仍然是以 $15+15L/1000\mu m$ 为精度目标的光学坐标测量系统的首选，ConoProbe Mark Ⅲ－HD50T 型锥光偏振测头将用来完成更高测量精度要求的光学坐标测量系统的使用。

8.6.3　光斑区域平均中点匹配算法

通过三角法测头粗糙度特性实验可以看出，由于三角法测头基于光的漫反射特性的工作原理，会对测量结果产生很大的影响，从而严重影响三角法测头在使用过程中的精度。而其每个点均为测头输出的真实结果，不能够通过滤波、屏蔽等方式消除这一误差，我们只能够通过数据处理算法来减小表面粗糙度特性在测量过程中带来的误差。在扫描测量范围内，测量结果和被测表面微观形貌变化相符，且具有一定的周期性，为此做出假设：所得到的扫描测量数据是多个正弦波合成的结果。

当我们使用三角法测头扫描自由曲面时，在一个很小的区域内，被测区域的曲率半径可以看做是一个定值，可以看做是在扫描一个球面。而在小区域扫描的过程中，扫描的轨迹可以看做为一条直线段，扫描球面这一三维问题又可以进一步简化为一个二维问题。建立的模型如图 8－40 所示。

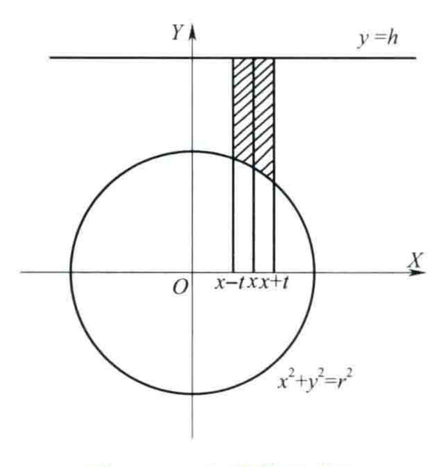


图 8－40　扫描简化模型

令 $\begin{cases} x=r\cos\theta \\ y=r\sin\theta \end{cases}$，则有

$$\mathrm{d}x = -r\sin\theta \cdot \mathrm{d}\theta \tag{8-51}$$

$$\theta = \arccos\frac{x}{r} \tag{8-52}$$

阴影部分面积的微分 $\mathrm{d}A$ 有

$$\begin{aligned}\mathrm{d}A &= (h - r\sin\theta)\,\mathrm{d}x \\ &= -r\cdot(h - r\sin\theta)\sin\theta\cdot\mathrm{d}\theta \\ &= (r - \sin^2\theta - rh\sin\theta)\cdot\mathrm{d}\theta\end{aligned} \tag{8-53}$$

则阴影部分面积 A 有

$$\begin{aligned}A &= \int_{x-t}^{x+t}(r^2\sin^2\theta - rh\sin\theta)\cdot\mathrm{d}\theta \\ &= r^2\int_{x-t}^{x+t}\sin^2\theta\cdot\mathrm{d}\theta - hr[-\cos\theta + C]_{x-t}^{x+t}\end{aligned} \tag{8-54}$$

因为 $\sin^2\theta = \dfrac{1-\cos2\theta}{2}$，则

$$\int\sin^2\theta\cdot\mathrm{d}\theta = \int\frac{1-\cos2\theta}{2}\cdot\mathrm{d}\theta = \frac{1}{2}\theta - \frac{1}{4}\sin2\theta + C \tag{8-55}$$

将式（8－55）带入式（8－54），则有

$$A = r^2\cdot\left[\frac{1}{2}\theta - \frac{1}{2}\sin\theta\cos\theta + C\right]_{x-t}^{x+t} - hr[-\cos\theta + C]_{x-t}^{x+t} \tag{8-56}$$

将式（8－52）带入上式（8－56），则有

$$A = r^2\cdot\left[\frac{1}{2}\arccos\frac{x}{r} - \frac{1}{2}\sin\left(\arccos\frac{x}{r}\right)\cdot\frac{x}{r} + C\right]_{x-t}^{x+t} - hr\left[-\frac{x}{r} + C\right]_{x-t}^{x+t}$$

$$A = \frac{r^2}{2}\cdot\left(\arccos\frac{x+t}{r} - \arccos\frac{x-t}{r}\right) +$$

$$\frac{(x-t)\cdot\sqrt{r^2-(x-t)^2} - (x+t)\cdot\sqrt{r^2-(x+t)^2}}{2} + 2ht \tag{8-57}$$

如图 8－41 所示，将阴影部分视为矩形，其宽度为 $2t$，则平均长度 m 为

$$m = \frac{A}{2t} \tag{8-58}$$

此时，矩形与圆的交点坐标（x'，y'）为

$$\begin{cases}x' = \sqrt{r^2-(h-m)^2} \\ y = h - m\end{cases} \tag{8-59}$$

由式（8－57）～式（8－59），可得到坐标值的误差（Δx，Δy）为

$$\begin{cases}\Delta x = x - x \\ \Delta y = y - y\end{cases} \tag{8-60}$$

其中，Δy 为采用这种算法之后，测头所产生的误差

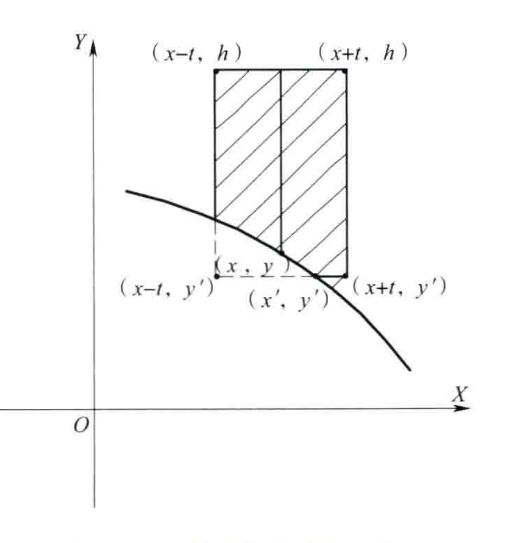


图 8－41　简化模型误差原理

$$\Delta y = y + \frac{r^2\left(\arccos\frac{x-t}{r} - \arccos\frac{x-t}{r}\right)}{4t} + \frac{(x-t)\sqrt{r^2-(x-t)^2}-(x+t)\sqrt{r^2-(x+t)^2}}{4t} \quad (8-61)$$

在测量的过程中，可以根据被测工件的理论模型，确定其最大的曲率半径，而根据标定的测头角度之间的最大夹角，可以设定 θ 的最大取值，从而将 r、θ 作为定值。关于 Δy 的表达式就可以简化为一个只含 t 自变量的一元一次方程。将得到的方程绘制成曲线，取 $r=25\text{mm}$，$\theta=75°$，从而可以得到 Δy 与 t 的变化趋势如图 8－42 所示。

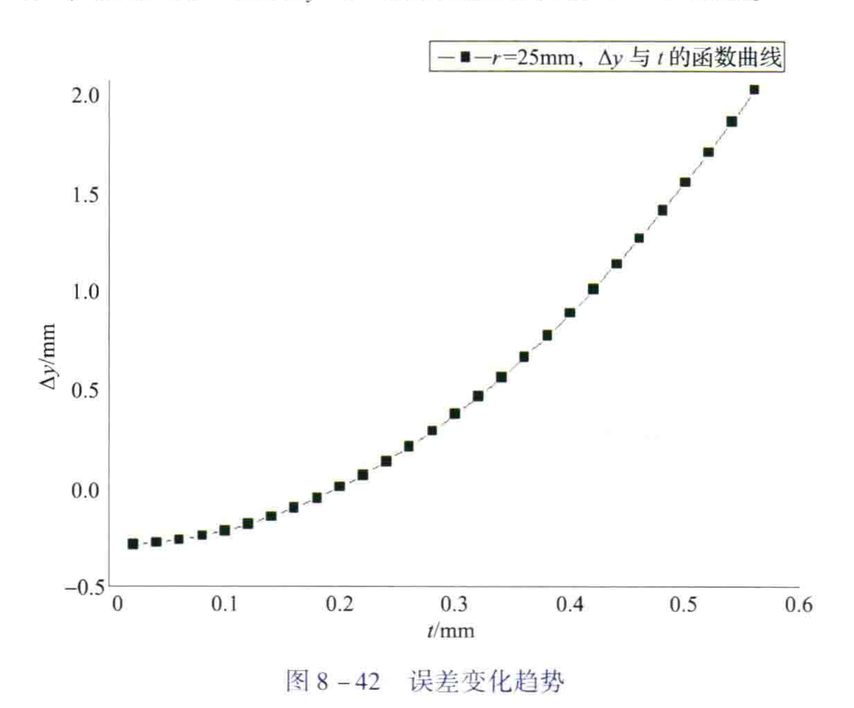


图 8－42　误差变化趋势

从图 8－42 可以看到，形貌误差 Δy 是 t 的单调递增函数。通过设定 Δy（形貌允许误差）的最大值，就可以得到该被测工件测量过程中，光斑区域平均中点匹配时，参数 t 的最大值。通过这样的方法我们可以对扫描得到的数据进行优化处理，而又不会使得被测表面的真实形貌失真。当设定最大形貌误差为 2μm 时，在上述规定参数不变的情况下，参数 t 的最大值为 0.5mm，只占很小的区域范围。在采样频率 50Hz，测量速度 3mm/s 的扫描测量过程中，可以使用单边 8 点共计 17 点平均中点，理论上可以对高频率的粗糙度特性带来的读数误差进行优化。在测量叶盆曲线和叶背曲线时，也可以通过从进排气边区域内起始、终止测量的方式获得全部自由曲线的信息。

8.6.4　光斑区域平均中点匹配试验

为了能够自动获得光斑区域平均中点匹配所需的点数，根据上述算法建立自动判断算法。通过被测工件的设计模型，计算出该模型每个特征的最小曲率半径，输入到光斑特征匹配软件当中，再根据当前光轴方向的标定结果，判断出最大的入射角大小，从而自动计算出在当前采样频率和扫描测量速度下，进行光斑特征匹配所需的点数。将扫描测量的数据导入软件，就能够自动进行光斑特征匹配，并且自动去掉测量数据前后若干个不能进行

匹配的数据点。

测量机的校准主要有探测误差（MPE_P）和尺寸误差（MPE_E）两种。其中，探测误差是在标准球上测量 25 个测量点，用这 25 个测量点拟合标准球并求出球心坐标，通过计算 25 个测量点到拟合的标准球的球心的距离的最大值和最小值，得到的最大值与最小值的差就是探测误差的大小；尺寸误差是通过测量 5 个不同长度的标准器在不同 7 个空间位置、角度下的测量值，每个标准器每个位置角度测量 3 次，共进行 105 次测量，得到测量机的测量结果与标准值之间的差，得到其尺寸误差。

使用光斑区域平均中点匹配的算法，针对平面进行扫描测量，测量之后得到的测量点的探测误差如图 8－43 所示。

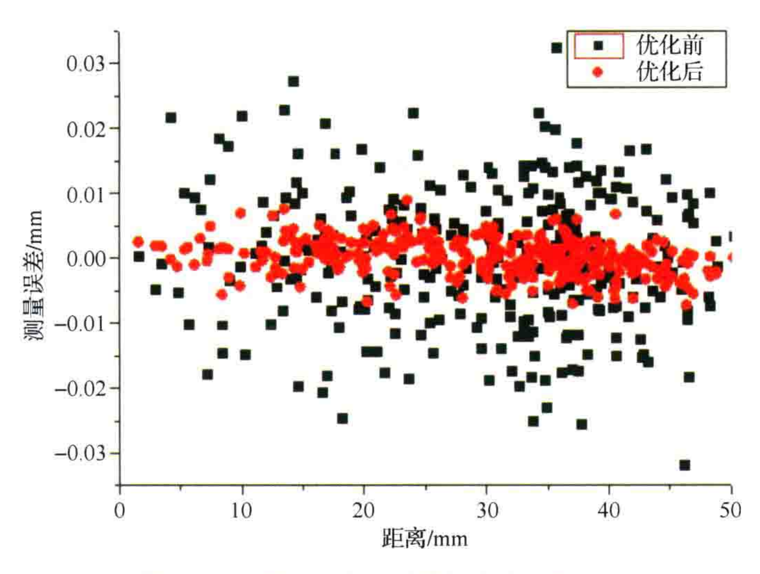


图 8－43　平面光斑区域平均中点匹配试验

通过将平面上采集的离散点进行光斑区域平均中点匹配前后分别拟合出被测平面，可以得到前后两平面的法向向量分别为（0. 000366，0. 002071，0. 999998）、（0. 000382，0. 002083，0. 999998），该方法不会影响测量结果。但对于探测误差（MPE_P）来说，光斑区域平均中点匹配可以有效降低探测误差的最大值近 75%，同时可以将探测误差减小到 ±0. 01mm 内，达到微米级。

而在对直径为 49. 973mm 的标准球球进行“六小段”扫描测量，通过自动匹配程序，得到匹配后的测量结果如图 8－44 所示。

仍然通过光斑区域平均中点匹配前后得到的两组标准球的测量数据可以拟合出标准球的球心坐标分别为（613. 156473，270. 138108，－519. 849749）和（613. 156946，270. 138060，－519. 849642），标准球的直径分别为 49. 960497mm 和 49. 959409mm，光斑区域平均中点匹配对标准球的测量结果影响不大。然而通过图 8－44 可以看出，光斑区域平均中点匹配可以大幅减小探测误差。

通过上述分析和实验可以得到以下结论：

①通过进行三角法测头的角度特性试验，为限定三角法测头测量的最大入射角度提供了试验数据。试验结果发现，三角法测头入射角在 55°以内，其角度特性对测量结果影响不大，可将 55°定为三角法测头的最大入射角度。

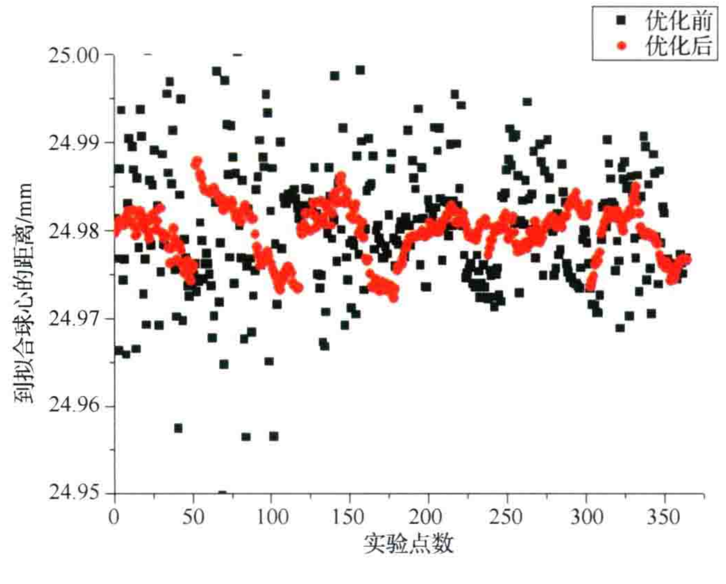


图 8-44 标准球光斑区域平均中点匹配

②在粗糙度特性检测试验中，采用光斑区域平均中点匹配方法，解决了三角法测头扫描测量粗糙度的误差较大的现存问题，使得三角法测头的测量精度提高到 10μm 左右，可以满足设计目标为 15 + 15L/1000μm 的光学坐标测量系统使用要求。

8.7 多坐标系测量数据拼接方法与试验研究

三角法测头在单一角度方向下只能够对被测物体的单一方向进行测量，不能够完全描述被测物体的所有特征。因此在生产测量的过程中，需要使用多个标定的角度。在 PH10M 测头座进行转位之后，三角法测头的光轴原点和机床坐标位置之间的偏置矢量发生改变，在进行数据处理之前，需要将这些偏置矢量之间的差消除。将多个角度下的测量数据完全拼接到统一的坐标系下，才能够从各个方向全面的评价被测物体的全部特征，也只有在这种测量方式下得到的测量数据，才能够体现光学坐标测量系统的测量精度。

8.7.1 多测头角度测量的数据拼接与坐标变换

在 PH10M 测头座进行有限分度转位的过程中，三角法测头的光轴原点到机床坐标值位置之间的偏置矢量（下简称“偏置矢量”），如图 8-45 所示。

由图 8-45 可以看出，在 PH10M 测头座进行转位的过程中，机床坐标位置和 PH10M 测头座轴心之间的相对位置关系保持不变，而 PH10M 测头座轴心与光轴原点之间的相对位置关系由于 PH10M 测头座的转位而发生变化，从而偏置矢量发生变化，导致使用三角法测头得到的测量数据不能够直接统一起来。在转位的过程中，PH10M 测头座的 A、B 两个轴均可以进行转位，使得光轴原点和 PH10M 测头座之间的相对位置关系不能够通过计算获得准确的数据，需要寻找相对确定的关系将不通测头角度下的测量数据统一起来。



图8－45 测头模型

在同一空间内，在被测物和标准球均不被移动时，标准球和被测物拥有固定的相对位置关系。因此，我们可以在标定完测头光轴方向之后，通过测量标准球，得到标准球的球心 O_1，并建立空间直角坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$（称作世界坐标系），使得其坐标轴与机床坐标系 $OXYZ$ 的三个坐标轴平行。通过如下平移矩阵，可以将机床坐标系下的测量数据，统一到世界坐标系下

$$(x',y',z',1)=(x,y,z,1)\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\t_x&t_y&t_z&1\end{bmatrix} \tag{8-62}$$

式中，$\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\t_x&t_y&t_z&1\end{bmatrix}$为平移矩阵，记作 $P_o(x\ y\ z)$ 为机床坐标系下的测量数据，$(t_x,\ t_y,\ t_z)$ 为平移向量，$(x',\ y',\ z')$ 为得到的世界坐标系下的测量数据。将不同方向的机床坐标系下的测量数据全部统一到世界坐标系下，就能够完成多角度测量数据的拼接。

当被测物拥有较高的制造精度且拥有数学模型时，可以通过建立工件坐标系的方式，根据数学模型自动规划轨迹进行测量。这也就需要根据实际使用情况，建立工件坐标系，完成工件坐标系与世界坐标系的数据转换。由于工件坐标系与世界坐标系的坐标轴不一定平行，在进行平移变换之后，还需要根据工件坐标系各轴与世界坐标系各轴的夹角，进行旋转变换，工件坐标系到世界坐标系的坐标变换如式（8－63）所示

$$(x',y',z',1)=(x,y,z,1)\begin{bmatrix}r_{xx}&r_{xy}&r_{xz}&0\\r_{yx}&r_{yy}&r_{yz}&0\\r_{zx}&r_{zy}&r_{zz}&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\t_x&t_y&t_z&1\end{bmatrix} \tag{8-63}$$

式（8-63）中，$\begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} & 0 \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} & 0 \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$为旋转矩阵，记作 R。r_{ij}表示工件坐标系的 i 轴与世界坐标系 j 轴夹角的余弦值。

8.7.2 多测头角度数据拼接测量试验

首先，通过光学测头光轴方向的标定和测量同一个标准球的球心坐标，建立“测头库”如表 8-4 所示。

表 8-4 光学测头库

PH10M 角度	球心坐标	光轴与机床坐标系坐标轴夹角
(90，180)	(613.6107，269.7251，-519.858)	(178.46625，88.96898，88.8646)
(90，-30)	(297.3805，345.8229，-518.025)	(30.9702，121.01648，89.52232)
(90，-60)	(357.4331，409.0085，-518.186)	(60.98125，151.06188，89.4385)
(90，-90)	(440.95556，433.71056，-518.594)	(91.03453，178.74766，89.29432)
(90，-120)	(525.6721，413.324，-519.034)	(121.03878，148.98169，89.0939)
(90，-150)	(588.8794，353.2827，-519.546)	(151.03029，119.0177，88.96555)
(90，-180)	(613.6107，269.7251，-519.858)	(178.46625，88.96898，88.8646)
(45，90)	(449.28505，130.88487，-389.379)	(89.66187，44.27018，134.31053)
(45，-135)	(539.49342，366.45523，-389.373)	(121.0929，119.80991，134.2661)
(45，135)	(545.34642，174.87666，-389.728)	(120.12743，59.09419，134.1143)
(45，45)	(349.96428，167.11391，-393.592)	(63.45556，60.34331，135.92231)

通过将每个角度的测量数据减去该角度下测量标准球的球心坐标，就可以将该角度下的测量结果统一到以标准球球心为原点，坐标轴与机床坐标系平行的世界坐标系下。

同样对标准球、标准圆柱体、标准立方块进行多角度测量数据拼接试验。使用两个测头角度测量两间距为 80.056mm 的平行平面，分别将测量结果拼接到世界坐标系下，得到两平面之间的距离为 80.054518mm，两平面的法向分别为（0.028103，-0.999603，0.001958）和（-0.027913，0.999609，-0.001887）。使用 4 个测头角度测量直径为 39.704mm 的圆柱，每个角度下测量该圆柱不同高度上的两段圆弧，分别将各角度下的测量数据拼接到世界坐标系下，通过计算得到拟合圆柱的直径为 39.718516mm。使用 4 个测头角度分别测量直径为 49.973mm 的标准球，在每个测头角度下测量该角度方向球冠上一小段直线，将每个测头角度下的测量结果拼接到世界坐标系下，通过计算得到拟合球的直径为 50.000822mm。

通过上述试验可以发现，在使用多测头角度下的测量数据拼接之后，可以准确得到被

测物的特征尺寸，测量误差小于 30μm。

8.7.3　转台旋转数据拼接

在转台数据拼接之前，需要将转台标定过程中使用接触式测头得到的基于接触式测头的测量数据统一到基于光学测头测量得到的世界坐标系下。其方法与光学测头的数据拼接相同，都是通过使用不通测头测量标准球的球心，获得两种测头的偏置矢量，从而加工接触式测头标定得到的转台标定数据，与非接触测头的世界坐标系统一起来。

在某一角度进行测量的过程中，我们需要将被测工件的坐标点从世界坐标系下的坐标转换当前转台极坐标系下的坐标。设以转台轴线为回转轴 L，以转台标定平面为 h 轴基平面，以转台轴线和机床坐标系 X 轴形成的平面与基平面的交线为 θ 的“零度”的极坐标系 R。首先，建立以转台轴线为 Z 轴，θ“零度”方向为 X 轴的空间直角坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$，得到世界坐标系到 $O_2X_2Y_2Z_2$ 直角坐标系的转换公式如式（8－64）所示。

$$(x_2,y_2,z_2,1)=(x,y,z,1)\begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} & 0 \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} & 0 \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix} \tag{8-64}$$

式中，$(x,\ y,\ z)$ 是世界坐标系下的测量数据；$\begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} & 0 \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} & 0 \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$为旋转矩阵，其中 r_{ij}是 $O_2X_2Y_2Z_2$ 坐标系的 i 轴与世界坐标系的 j 轴的夹角余弦；$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix}$为平移矩阵，$(t_x\ t_y\ t_z)$ 为转台基平面的中心到直接坐标系原点的偏置矢量。

再将 $O_2X_2Y_2Z_2$ 坐标系的测量数据转换到极坐标系 R 下，其变化方程如下

$$\begin{cases} r=\sqrt{x_2^2+y_2^2} \\ \theta=\arccos\dfrac{x}{\sqrt{x_2^2+y_2^2}}=\arcsin\dfrac{y}{\sqrt{x_2^2+y_2^2}} \\ h=z \end{cases} \tag{8-65}$$

其中，θ 为坐标点在基平面的投影与基平面中心的连线与 θ“零度”的夹角，规定逆时针旋转为正，顺时针旋转为负。

当转台逆时针转角 θ 时，只需要进行如下坐标变换以将此时得到的测量结果转换到极坐标系 R 中即可

$$\begin{cases} r=r_i \\ \theta=\theta_i-\theta \\ h=h_i \end{cases} \tag{8-66}$$

通过上述变换，就能够将转台在不同转角情况下的测量数据统一到极坐标系 R 下，以得到测量结果。

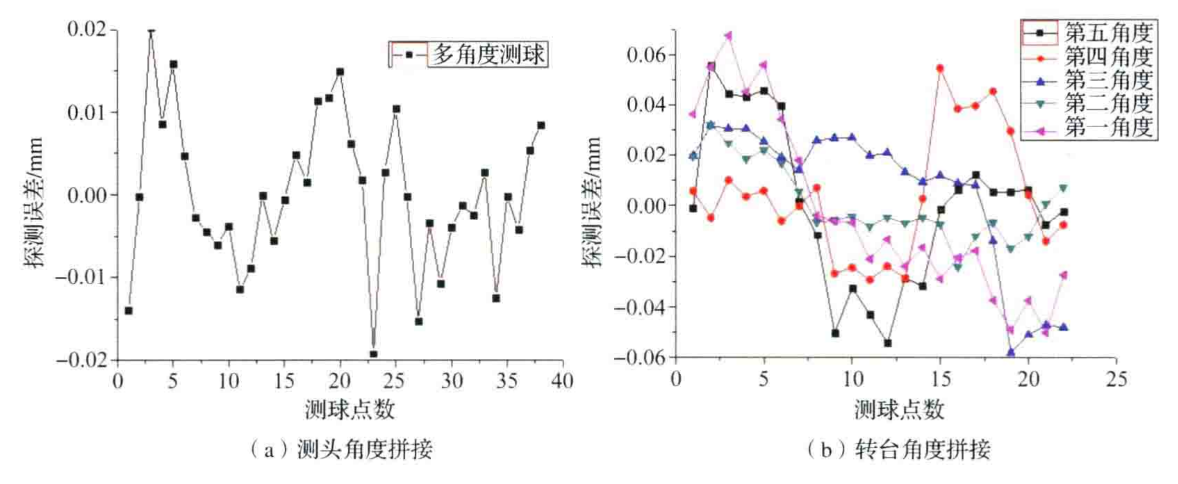
8.7.4 转台旋转数据拼接测量试验分析

将直径为49.973mm的标准球放置于转台上，通过转台旋转数据拼接，进行测量试验。

通过将拼接后的实验数据进行拟合，得到拟合后的标准球直径为49.997258mm。可以看出，当使用转台旋转法进行数据拼接时，得到的测量精度优于使用测头转位得到的测量精度。

理论上测头角度拼接和转台拼接方法可行，但由于数据拼接过程中，需要使用接触式测头和光学测头进行测量标准球的球心。因此，光学坐标测量系统的测量精度会直接影响数据拼接的精度。

分别将两种数据拼接方法中，对标准球的测量点进行探测误差计算，得到测头角度拼接和转台角度拼接的测球探测误差如图8－46所示。



（a）测头角度拼接　（b）转台角度拼接

图8－46　数据拼接探测误差

从图8－46可以看得到，不同角度下的数据拼接到一起之后，不同角度测球的探测误差变化不大，且能够较准确的得到球的直径。由此可见，这种数据拼接方法可行。

通过数据拼接测量试验，我们可以得到多测量角度下的测量数据拼接，得到30μm的测量精度。在进行较简单的零件测量时，数据拼接测量法得到的测量精度低于转台回转法得到的测量精度。而当被测工件较复杂，转台转动不能够完全测量所有特征时，可以使用多角度下的测量数据拼接的方法进行测量，精度为25μm。这是由于测量机原有的21项误差补偿通过Rational DMIS软件控制Pantec控制柜进行补偿，当使用光学测头进行测量的过程中，测量软件不支持非接触测头，使得21项误差补偿中的9项角摆误差由于没有测杆长度而补偿无效，在测量的过程中会将测量误差放大。

第9章　精密超精密加工技术在抗疲劳制造技术中的应用

一项先进的制造技术至少要满足产品的两种需求，一是为了制造实现产品功能的机械结构，另外一个是要满足保障生存的经济可承受性的需求，因此对产品及制造技术提出了长寿命、高可靠性的要求，抗疲劳制造技术正是基于上述背景提出的先进制造技术。

抗疲劳制造技术与长寿命关键构件是航空工业的核心竞争力，据统计，在通用机械构件失效中疲劳失效占50%～90%，而航空关键构件中疲劳失效则占80%以上，特别是诸如叶片、轴承、齿轮、盘轴类零件、起落架、对接螺栓等飞机发动机的关键部件，疲劳是安全服役威胁最大的失效模式，也是制约着我国飞机及发动机寿命的主要原因。抗疲劳制造技术已成为航空制造业中首先要解决的核心问题。

9.1　引言

疲劳破坏是承受反复应力/应变的机械构件高应力集中区域较弱的晶粒，在交变作用下经过一定的循环次数以后形成微裂纹，然后发展成宏观裂纹，裂纹继续扩展最终导致断裂的过程，这也是这类构件破坏的主要原因和破坏的主要形式。一切因变载荷引起的突然破坏都属于疲劳破坏。疲劳破坏的特点是：

①疲劳破坏是在循环应力或循环应变作用下的破坏。

②疲劳破坏必须经历一定的载荷循环次数。

③零件或试样在整个疲劳过程中不发生宏观塑性变形，其断裂方式类似于脆性断裂。

④疲劳断口明显地分为粗粒、光滑两个区域。

按研究对象、失效周次、应力状态、载荷（时域、幅域、频域）变化情况、载荷工况与环境，可将疲劳分为：材料疲劳和结构疲劳、单轴疲劳和多轴疲劳、高周疲劳（HCF）和低周疲劳（LCF）、恒幅疲劳、变幅疲劳、随机疲劳、常规疲劳、高/低温疲劳、热疲劳、热－机械疲劳、腐蚀疲劳、接触疲劳、微动磨损疲劳、冲击疲劳等。影响疲劳强度的因素有：形状、尺寸、表面状态、平均应力、复合应力、加载频率、应力波形和停歇、腐蚀介质、温度等。

发动机结构中，经常发生一些突然性的破坏，从静力强度分析，其工作应力水平很低，但它们所承受的往往是周期性变化的载荷，这种载荷比静载荷的破坏性要大得多。交变应力的强度极限比静应力的强度极限小得多。疲劳失效与静强度失效有着本质的区别：静强度失效发生在构件的危险截面中产生过大的残余变形或最终断裂；疲劳失效则是由于在构件局部应力最高处较弱的晶粒在变应力下形成裂纹，并在循环变应力

下扩展为宏观裂纹导致最终断裂。在静强度设计中，所用的材料强度指标是屈服极限或强度极限，设计的出发点是名义应力（或基本应力）；在疲劳失效设计中所用的材料强度是疲劳极限，设计的出发点是局部应力（或称峰值应力）。

疲劳破坏所包括的类型十分广泛，例如发动机上所遇到的疲劳破坏类型主要有：高周疲劳（HCF，如叶片）、低周疲劳（LCF，如轮盘）、蠕变疲劳（CF，如涡轮叶片）、热疲劳（TF，如叶片、机匣）、接触疲劳（如叶片与轮盘榫头/榫槽结合处、轴承）等。

造成疲劳失效的原因主要有设计（包括应力集中、循环载荷水平、尺寸、选材等）、制造工艺（包括表面完整性、装配等）、材料（包括化学成分、组织结构、力学性能等）、使用维护（包括超载、外来损伤、腐蚀等）等方面。其中设计导致失效的原因主要有包括设计载荷不准确、设计结构不合理、设计选材不当等；材质导致失效的原因直接表现为与零件失效模式对应的材料力学性能不符合设计要求，如疲劳断裂失效对应的材料疲劳强度低，与拉伸过载断裂对应的材料抗拉强度低等，主要原因有材料的化学成分不合格，热处理制度或工艺不当，金相组织不符合要求，存在冶金缺陷等。使用维护原因一般表现为超过限制使用、维护不当造成和环境侵蚀（腐蚀介质和温度）。而由于制造工艺原因包括：铸造、锻造、切削加工、热处理、表面处理、焊接、装配等，其中切削加工中的尺寸超差、表面粗糙度差、毛刺、划伤、表面烧伤、裂纹、刀痕等原因是造成疲劳失效的主要原因之一，也是精密超精密加工技术所关注的领域。

高强度铝合金、钛合金、超高强度钢和高温合金等广泛用作飞机、发动机各种精密机械的主承力构件，包括起落架、主承力接头、框、梁、连接螺栓、壁板、传动轴、轴承、齿轮、压气机叶片、盘、涡轮盘和叶片等，其用量占到飞机、发动机结构重量的 70%～80%。之所以获得如此广泛的应用是因为它们具有很高的抗拉强度和疲劳强度等优良性能，可以实现航空构件质量轻、体积小、长寿命、高可靠。但是，高强度合金的突出弱点是疲劳强度对应力集中敏感，如当应力集中系数 $K_t = 3$ 时疲劳强度降低约 50%，$K_t = 5$ 时则降低约 80%。而且，这一敏感特性随强度和硬度提高而增加，例如钢渗碳后硬度达到 HRC60 以上，此时表面划伤造成的应力集中可超过其抗拉强度。据统计，机械构件失效中疲劳失效占 50%～90%，而航空构件中则占 80% 以上。

因为疲劳失效具有低应力和无宏观变形等特征，与其它应力失效相比是一种更危险的失效模式，疲劳对构件表面状态十分敏感，80% 以上的疲劳裂纹起始于切削加工刀痕、划伤、组织损伤、夹杂物及其他表面缺陷造成的应力集中处，裂纹萌生寿命占到疲劳总寿命的 80% 以上，表面缺陷造成的局部应力集中迭加在疲劳载荷上大大加速了裂纹萌生，剧烈降低了疲劳寿命。总而言之，表面完整性决定了构件的疲劳性能。

另据统计，在 20 世纪 60—90 年代影响重大的 14 起航空发动机失事中 13 起属疲劳失效，80 年代国内某型飞机出现了由于机翼主梁的疲劳裂纹引起了大批架次的停飞，2003 年统计的结果表明 300 多起发动机故障也大多为疲劳失效所致。疲劳是对飞机、发动机关键构件服役安全威胁最大的失效模式，如不解决非但不能发挥高强度构件的优势，还可能造成潜在灾难性后果。

9.2　抗疲劳制造技术基本概念

9.2.1　制造技术发展的三个阶段

从抗疲劳制造技术体系出发，制造技术发展过程可分为以下三个阶段。

9.2.1.1　第一代制造技术——成形制造技术

成形制造技术是利用加工设备对工件的外形尺寸或性质进行改变的过程，是以满足尺寸、形位公差、表面粗糙度等设计图样规定的要求为目的，其主要特点是依据表面形貌（粗糙度、划痕等）特征评价加工质量，保证设计图样要求，但对构件抗疲劳性能的要求重视程度不够。这其中最重要的一个问题就是成形制造中切削加工的刀痕无法消除，表面粗造度差，这就造成了工件抗疲劳强度的应力集中问题。在实际使用过程中，80% 的疲劳源产生于切削刀痕，这成为疲劳失效的主要成因。

寿命短、可靠性差、结构重是目前航空构件存在的三大问题，而成形制造技术正是产生这三大问题的根本原因，主要体现在以下三个方面。

（1）成形制造技术不适应先进的设计技术

我国于 1985 年完成了军用飞机构件安全 – 寿命设计规范的编制，但是由于没有相应表面完整性制造技术和工艺，制造出来的零件从形状精度和尺寸精度能满足设计要求，但是其寿命等性能指标根本无法满足设计要求，形成了设计技术和制造技术的倒挂。而美国在 1948—1970 年期间由美国空军材料实验室（AFML）主持完成了高强度构件表面完整性制造研究，提出了《机械加工构件表面完整性制造指南》，标志着从成形制造向表面完整性制造的转变基本完成。在此基础上 1971 年美国空军颁布了军用飞机安全 – 寿命设计规范，1975 年又颁布了损伤容限和耐久性设计规范，正是由于上述原因美国第三代战机的寿命提升到 5000 飞行小时（Fh）。

（2）成形制造技术不适应高强度合金的加工

高强度合金材料具有高的材料强度，特别是高的疲劳强度，是航空关键构件最常用的材料之一，包括高强度铝合金、高强度钛合金、超高强度钢、高温合金等，结构重量超过飞机和发动机整体重量的 80%，在大型客机中也超过了 50%，例如用于飞机起落架的 300M 钢、用于航空发动机轴承的 M50NiL、用于发动机机匣及盘轴类零件的 GH1469 等都属于此类材料。

①应力集中

构件因外部因素或自身形状尺寸突变、表面或内部缺陷而引起局部应力较平均应力有显著变化的现象称为应力集中。例如在机械加工及制造过程中，构件上会留下微观缺口或者零件的截面积会产生变化，这种零件一旦承受工作载荷，则会在其缺口或截面积变化部位出现应力应变显著增大的情况。

材料承受的交变应力与静载荷下的强度极限之比称为理论应力集中系数 K_t。理论应力集中系数 K_t 是以弹性力学理论为基础，最初是通过光弹法和电阻法实验测定而得出的，也可以采用有限元方法计算得到，它只与试样的几何形状有关，不受材料影响，一般也将其称为形状系数，它代表缺口处应力提高的倍数或程度。此外，表面应力集中系数是指由

于表面加工状态参数及其相互关系计算的应力集中值 K_{st}；构件内部硬度、组织、残余应力、界面等不均匀引发的应力集中 K_{ut}，本节暂不考虑此应力集中系数。

②表面形貌应力集中系数

零件的表面几何形貌纹理对零件疲劳性能影响是毋庸置疑的。在理论研究与工程实际中，通常可以采用不同的应力集中系数来评估表面粗糙度对疲劳强度或寿命的影响，而这些应力集中系数通常取决于表面微观不平度的几何参数。

然而，有些情况下，仅靠上述的表面粗糙度幅度参数并不足以描述或表征表面形貌纹理特征对零件疲劳性能的影响。例如，对如图 9－1 所示的车削加工锯齿型表面轮廓和类似余弦波型表面轮廓，假设两个轮廓曲线的高度幅值相同，它们均有相同的表面粗糙度参数值 Ra、Ry、Rz。

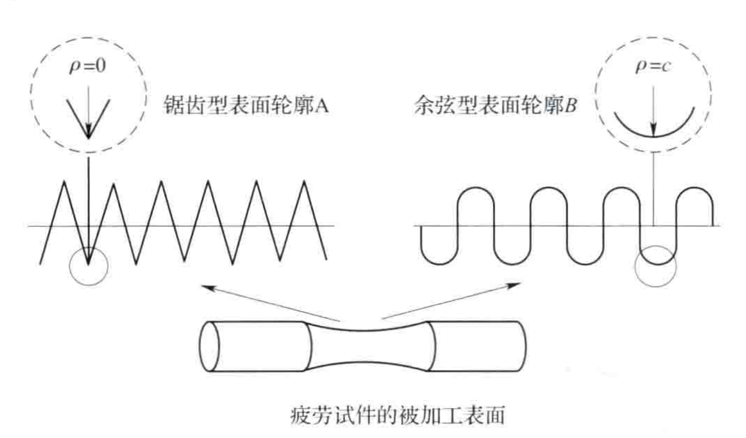


图 9－1　理想状态下疲劳试件的锯齿波和余弦波表面形貌

尽管理论上说锯齿型轮廓具有更小的轮廓波谷曲率半径，会使锯齿处的应力集中程度更加严重，从而最终对零件的疲劳寿命更加不利，但是如果仅根据表面粗糙度参数来确定其修正系数的话，则图 9－1 所示的两种表面轮廓将有相同的修正系数值。虽然标准表面粗糙度参数为定量表征轮廓高度分布提供了一个简单而有效的方式，但仅根据表面粗糙度幅度参数来估算零件的疲劳强度显然是不够全面的。

考虑到宏观结构的几何不连续对工程零件疲劳强度的影响，通常可采用结构应力集中系数 K_t 来表征。因此，可以借鉴宏观结构应力集中系数 K_t 的思想来定量估算金属零件加工后的表面微观形貌纹理特征与其所造成的应力集中以及最终疲劳性能之间的关系。

对于一个如图 9－2（a）所示的承受均匀拉伸载荷、含较浅半椭圆缺口的无限大平板，如果其缺口高度和缺口根部曲率半径分别为 t 和 ρ，则该缺口边的局部应力集中为

$$K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{\rho}} \tag{9-1}$$

如果该平板含有多个相同的半椭圆缺口，如图 9－2（b）所示，则其理论应力集中系数 K_t 可以表示如下

$$K_t = 1 + 2\sqrt{\lambda \frac{t}{\rho}} \tag{9-2}$$

其中 λ 表示微观不平度间距与其高度的比值系数，$\lambda = b/t$。对于切削加工后的零件表面，可以看作由许多微观几何缺口组成。考虑到零件表面微观几何形貌的平均缺口高度 t

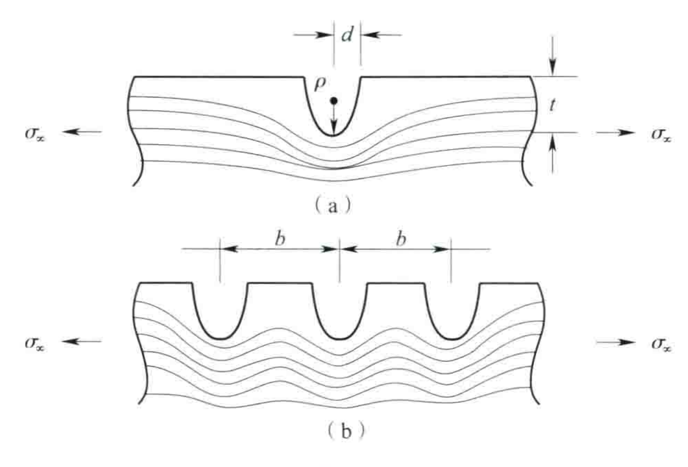


图 9－2　单一缺口与多个缺口的应力集中示意图

在实际工程中很难准确测量，同时还考虑到粗糙表面的形貌纹理特征（相当于在试件上存在一系列连续相邻的微观缺口）可能使零件表面的实际应力集中程度比仅含单个微观缺口时有所降低（如图 9－2（a）），纽伯（Neuber）提出了下面一个可采用标准表面粗糙度参数和缺口轮廓谷底半径值来表征表面应力集中系数的半经验公式如下，即应力集中系数 K_t 与零件表面上多次重复出现的微小切削刀痕（刀纹）的几何参数之间的关系为：

$$K_t = 1 + n\sqrt{\lambda \frac{Rz}{\rho}} \tag{9-3}$$

式中 R_z 表示表面轮廓微观不平度十点高度值；ρ 表示粗糙表面轮廓谷底曲率半径；λ 表示微观不平度间距与其高度的比值系数，$\lambda = b/t$；系数 n 代表着不同的应力状态，$n=1$ 时表示表面承受剪切载荷，$n=2$ 表示表面承受拉伸或弯曲载荷。采用上述经验公式可以估算机加工零件表面上的微观不平度所导致的应力集中程度，该公式体现了表面微观形貌的几何参数对表面应力集中系数的影响。对于加工的表面纹理来说，λ 实际上是很难精确确定的；常规切削机加工以后的表面轮廓通常取 $\lambda=1$，而 Rz/ρ 值的范围通常为 0.3～0.5，因此，切削加工表面由于几何形貌带来的理论应力集中系数值约为 1.5～2.5；磨削加工后的表面粗糙度如果在 IT7～IT9 的级别的话，则其应力集中系数大致为 1.2～1.48。

③高强度合金疲劳强度应力集中敏感

高强度合金材料具有一个显著的特点，其对疲劳强度应力集中非常敏感。如图 9－3 所示的为几种合金材料不同形式的疲劳强度，从图中可以看到当 $K_t=3$ 时材料的疲劳强度 σ_f 下降约 50%，而当 $K_t=5$ 时疲劳强度 σ_f 则会下降约 80%。对于超高强度合金及高温合金，问题更加突出，例如 M50NiL 表面渗碳 HRC＞60，其表面划伤引起的应力集中值已经超过了材料的抗拉强度。M50 材料制造的航空发动机轴承国产的使用寿命与国外相比相差一个数量级；如不解决成形制造引起的这些问题，存在潜在的灾难性的危险。

（3）成形制造技术将导致航空构件提前疲劳失效

疲劳是高强度合金构件失效的主要模式，据统计机械构件失效中疲劳失效占 50%～90%，其中航空构件占 80% 以上。疲劳失效具有低应力和无宏观变形等特点，与其他失效方式相比是更加危险的失效模式，这也是长期以来人们竭力防止其发生的原因。疲劳是一种表面敏感特征，疲劳强度对构件表面状态十分敏感。据统计，疲劳失效中 80% 以上的裂纹起始于诸如切削加工刀痕、划伤、组织损伤、夹杂物及其他表面缺陷造成的应力集

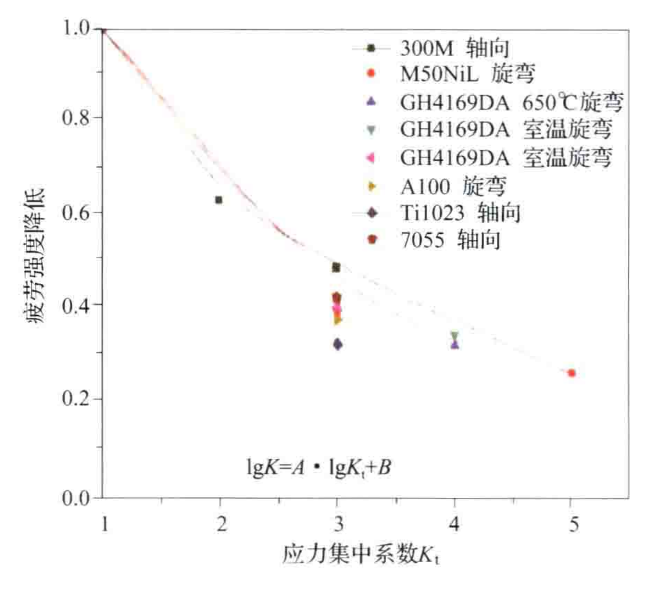


图 9-3 高强度合金材料应力集中系数对疲劳强度的影响

中处，成形车削加工中造成大量刀痕不连续和高应力集中，导致构件提前失效，如图 9-4 所示。试验证明，在高强度合金构件疲劳总寿命中，裂纹萌生寿命占 70% ~80%，表面缺陷造成的局部应力集中叠加在疲劳载荷上，大大加速了裂纹的萌生，急剧降低了疲劳寿命。

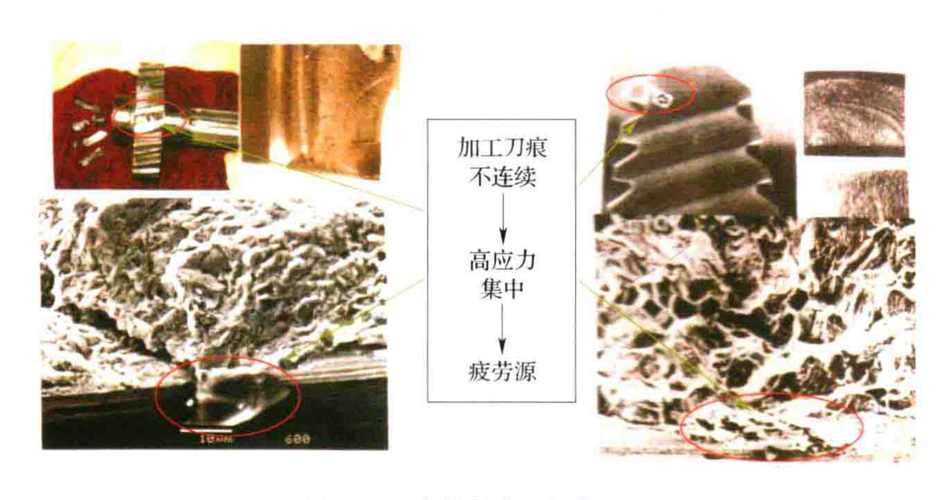


图 9-4 齿轮断齿及榫齿裂纹

9.1.1.2 第二代制造技术——表面完整性制造技术

表面完整性是指零部件加工后表面几何特性和表面物理性质的总称，表面几何特性包括表面粗糙度、波纹度、纹理、擦痕、几何形状和尺寸偏差等技术指标，如果表面粗糙度差，有刀痕，就会在工件表面形成一个个的应力集中点，增大了应力集中系数及缺口效应，也就形成了疲劳裂纹的萌生源。表面物理性质包括表面层的微观组织、塑性变形、再结晶、显微硬度、残余应力、微观裂纹、应力集中等，属于内部加工效应。

从表面完整性制造技术的发展来看，可以划分为四个阶段。

（1）对表面完整性的初步认识阶段

美国金属切削研究协会于 1964 年首次提出了表面完整性概念，并将其定义为：由于

机械加工或其他表面加工方法的影响，加工出的表面所具有的固有状态或强化状态，这是人们对表面完整性的初步认识，主要认识到了机械加工零件表面的固有状态或强化状态对零件使用（服役）性能有影响，并未涉及到零件的表层特征。

（2）机械加工构件表面完整性指南的编制

该阶段研究所涉及的内容主要是描述和控制在制造过程中零件表面层可能产生的各种变化以及这些变化对零件成品最终使用性能的影响，在此开始将表层特征也加入到表面完整性的研究领域中。

进入20世纪70年代，人们对航空航天常用机械结构中关键零件的可靠性和寿命要求越来越重视，对加工零件表面层内的状态开始进行更为细致和系统的研究。当时，前苏联等国家主要是针对切削加工后表面硬化的深度及程度和表面层的残余应力大小、方向及分布进行研究，并使用“表面质量”这一名词来描述经过机械加工后的零件表面和表面层给零件性能带来的影响。

1970年美国编制的机械加工构件表面完整性指南中详细论述了表面完整性的定义以及它的重要性，总结了被加工零件当时所面临的诸多表面完整性问题，强调指出：传统或非传统加工工艺将会使合金表面和表面层产生塑性变形、微观裂纹、相变、显微硬度、撕裂和裂纹、残余应力等冶金学的变化。并首次对表面完整性特征参数数据进行了描述，提出了三个级别表面完整性数据组，包括最小数据组、标准数据组和广义数据组，如表9－1所示。

表9－1　表面完整性评价标准级别及评价标准的内容

最少数据组	标准数据组	广义数据组
几何形状误差 1. 表面粗糙度测量值或微观形貌图 2. 表面纹理组织数据	“最少数据组”数据	“标准数据组”数据
微观组织（一） 1. 表面缺陷（裂纹、擦伤、毛刺等） 2. 某些化学元素作用的痕迹（氢、氧等） 3. 使用扫描电镜系列照片 4. 切削瘤或残渣沉积等	物理力学性能试验 1. 表面残余应力大小、方向和分布 2. 强度试验（疲劳强度、极限强度等）	特定环境下的应力腐蚀试验
微观组织（二） 1. 金相组织变化 2. 微观裂纹 3. 晶间腐蚀 4. 微观缺陷（夹杂、皱折等） 5. 塑性变形 6. 表面层局部腐蚀 7. 再结晶 8. 变质层的影响 9. 再沉积		各种补充机械试验数据 1. 蠕变试验 2. 裂纹扩展试验 3. 扭矩试验 4. 应力破坏试验 5. 材料韧性试验 6. 低频疲劳试验 7. 抗拉试验 8. 表面化学试验 9. 其他特殊试验
热影响层		
加工硬度的变化		
棱边质量		

（3）建立了表面完整性与构件使用（服役）性能的关系

随着制造技术的进一步发展，对各种机械产品的加工质量要求也越来越高，研究中发现许多零件的损坏都是首先从表面下几十微米范围内开始的，表面之下的冶金学状态和机械性能变化对零件使用性能和疲劳寿命的影响越来越显著，加工零件的表面完整性特征研究因此也得到越来越多的关注。

1989 年英国发展了表面完整性的概念，指出表面完整性是已加工表面形貌学的、机械的、化学的、冶金学的性能以及它们与使用性能的关系。表面完整性的研究出现了多学科的交叉，产生了很多新的发现，使表面完整性对零构件性能的影响有了更深层次的认识。

在此阶段，基于第二阶段提出的三个级别表面完整性数据组，美国于 1986 年颁布了表面完整性美国国家标准 ANSI B211. 1 1986，如表 9 - 2 所示。在该标准中，只使用了最小数据组（MSIDS）和标准数据组（SSIDS），而且与表 9 - 1 相比进行了一定程度的简化。另外，该标准制定了最少两级加工强度，分别代表粗劣加工和精细加工。这个标准与表面完整性数据组相比，直接和试验测试联系起来，更加实用可行。

表 9 - 2　表面完整性数据组（ANSIB 211. 1 1986）

最小数据组（MIIDS）（最少两种加工强度等级）	标准数据组（SIIDS）
材料、材料硬度以及热处理或冶金状态 工艺以及工艺强度等级或者加工参数 表面粗糙度 *Ra* 横截面微观组织照片（×1000） 显微硬度变化	最小数据组 + 残余应力分布 高周疲劳 *S* - *N* 曲线 参考 *S* - *N* 曲线或材料的基础疲劳极限强度

（4）通过控制表面完整性的表征参数提高被加工零件的疲劳寿命

进入 21 世纪，表面完整性的概念得到了进一步的发展。格里菲斯（Griffith）于 2001 年分析了表面完整性表征参量的描述与测量，并研究了如何通过控制表面完整性的表征参数来提高被加工零件的疲劳寿命。2010 年，美国阿斯泰科霍夫（Astakhov V. P.）论述了表面完整性这一概念的起源及发展，指出：表面精整、表面粗糙度、残余应力、冷加工及晶相改变都会对已加工零件的表面性能产生严重影响，可造成疲劳和应力腐蚀；2010 年美国的波罗·达文（Paulo Davin）将表面完整性定义为：对使用性能具有影响的一系列各种各样的表面属性（包括表面的和深度方向的）。

综合国内外关于表面完整性的研究，将表面完整性定义为：以疲劳性能为判据，通过控制工艺方法形成的无损伤或强化的表面状态（包括表面的和深度方向的）。近半个世纪以来"表面完整性"制造技术已被工业发达国家广泛用于生产中。

9. 1. 1. 3　第三代制造技术——抗疲劳制造技术

随着对寿命可靠性、结构重量等使用性能指标要求的不断提高，高强度结构材料被大量应用于制造关键承力构件，高强度结构材料本身具有很高的抗拉强度和固有疲劳强度，因此其抗拉强度越高，疲劳强度也应越高，但是由于高强度结构材料的疲劳强度具有对应

力集中比较敏感的突出弱点，使其固有疲劳强度无法发挥出优势，因此对高强度结构材料零件进行加工时不仅要满足尺寸、形状、粗糙度等成形制造的技术要求，更要注意残余应力、组织损伤、硬度等表面完整性抗疲劳制造技术指标的要求。

抗疲劳制造技术是在控制工件表面完整性的基础上，以疲劳性能为主要判据和提高疲劳强度的先进制造技术，它是指在不改变零件材料和界面尺寸的前提下，通过在制造工艺过程中改变材料的组织及应力分布状态来提高零部件疲劳寿命的制造技术，这种技术的一个突出特点是不改变零件的结构和材料，不增加材料的重量，但能大幅度提高材料疲劳寿命。抗疲劳制造技术与成形制造技术相比，评价加工质量的标准是：不仅要与设计图样一致，还必须与设计性能一致。在保证工件尺寸、形位公差合格的同时，更加注重工件的疲劳性能。

抗疲劳制造技术是过程的控制而不仅仅是指标的控制，本质是构筑抗疲劳表面变质层，保证了疲劳寿命。抗疲劳制造技术的基本理论是无应力集中理论，也就是说“不同应力集中构件具有无应力集中时材料的固有疲劳强度”。

前面从应力集中视角认识了疲劳问题，所以就应从应力集中入手解决构件的寿命问题。

“无应力集中”抗疲劳概念理论模型如图9－5所示，其中σ_{af}为构件实际疲劳强度，σ_f为材料固有疲劳强度，σ_{df}为设计疲劳强度。

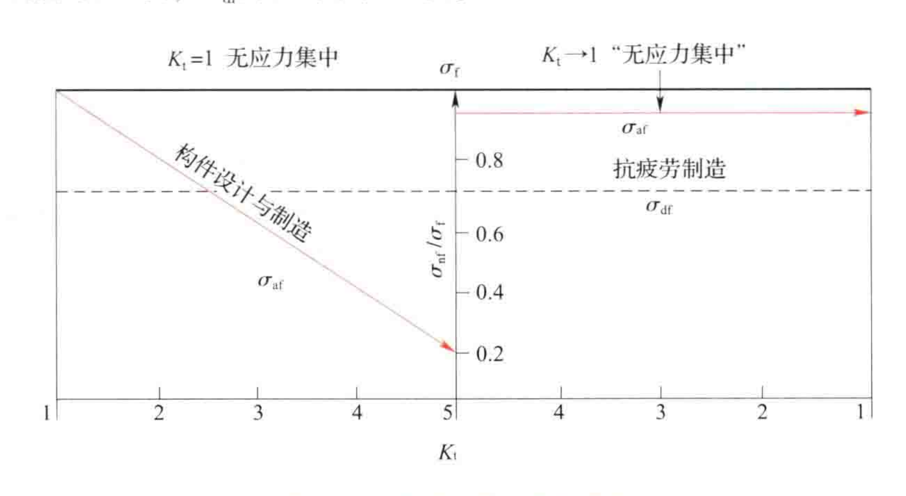


图9－5 无应力集中理论模型

当理论应力集中系数$K_t=1$，即无应力集中状态，构件实际疲劳强度σ_{af}为固有疲劳强度σ_f，高于设计疲劳强度σ_{df}，具有无限寿命；而经结构设计和制造加工后，构件局部表面存在应力集中，$K_t \gg 1$，σ_{af}降低，甚至远低于σ_{df}，导致过早失效；经表面层组织再造改性后，构件局部表面应力集中仍然存在，但σ_{af}回复到接近σ_m而远高于σ_{df}，即“$K_t \to 1$”，呈现“无应力集中”状态。

试验证明：喷丸、孔挤压、螺纹滚压等表面层组织再造改性显著提高了试件疲劳强度，试件K_t值越高，疲劳强度回复越大；表面粗糙度值越高，疲劳强度回复也越大。尽管试件K_t值仍然保持不变，但各K_t值下的疲劳强度都回复到接近于其固有疲劳强度，形成“$K_t \to 1$”的“无应力集中”表面完整性状态，如图9－5所示。在此状态下，原构件结构造成的应力集中通过表层组织再造改性得到补偿，效果相当于疲劳强度不再对应力集

中敏感，“无应力集中”抗疲劳概念表述为构件表面造成完整的接近固有疲劳强度的等疲劳强度包络，造成一种“无应力集中”表面完整性状态。

9.2.2 抗疲劳制造技术发展概况

抗疲劳制造是一代先进制造技术，也是一种新制造理念。抗疲劳制造覆盖了航空构件的主要制造技术领域：如表层硬化技术领域，涉及诸如机械传动齿轮、轴承、轴及其他以接触疲劳为主要失效模式的构件；机械加工技术领域，涉及以机械加工表面为服役表面的构件；表层组织再造改性技术领域，涉及以疲劳为主要失效模式的构件。所谓抗疲劳制造的理念是说在高强度合金构件从设计到制造加工以及组合装配的全过程中，无不遵从抗疲劳的理念，无不遵从“无应力集中”抗疲劳概念，无不采用降低应力集中的抗疲劳设计方法和制造技术，而且涉及技术、管理、业者素质等观念的更新。

抗疲劳制造具有十分复杂的科学内涵，研究发展抗疲劳制造需解决一系列的科学问题和方法。如构筑抗疲劳表面涉及的物理、化学及其耦合演化规律和原理；构件服役过程中，抗疲劳表面演化、重构的各种科学规律和原理；设计抗疲劳制造方法涉及的各种科学原理等。抗疲劳制造还涉及到表面完整性表征、评价和检测技术。其中，除了“成形”制造所检测的形位、表面粗糙度、硬度等信息外，主要有疲劳、应力腐蚀、组织结构、应力场及其他一些性能。

美国从 1948 年开始研究铝合金 2024、钛合金 Ti6Al4V、超高强度钢 4340、高温合金 Inconel 718 等高强度合金的抗疲劳机械加工，并于 1970 年由美国空军材料实验室（AFML）发布了《机械加工构件表面完整性指南》，基本实现了向抗疲劳制造的转变。在此基础上，美国空军于 1971 年颁布了军用飞机安全 - 寿命设计规范 MIL - A - 08866A。此后，美国三代战机如 F - 15、F - 16 达到 5000 飞行小时的长寿命。从 1970 年至今的 40 多年间，又发展了大量的新技术，不断完善和提高了抗疲劳制造平台，其中包括高效、低应力机械加工及其过程模拟、仿真、预测和数字化技术。表层硬化技术的发展使传动齿轮寿命提高了 20 ~ 40 倍，并可将超高强度钢齿轮重量减少 50%。激光冲击和超声喷丸是表层组织再造改性技术的新成就，前者把铝合金 7075 - T6 的微动磨损疲劳寿命提高了 2 个数量级，后者把高强度不锈钢的疲劳寿命提高了 25%。据报道，美国用超高强度钢 AF1410 制造 B - 1 飞机机翼作动筒，比原用 Ti6Al4V 合金减重 10.6%，制造成本降低 30% 以上。如今，F - 16 飞机的寿命已延长至 8000 飞行小时，四代战机 F - 22 寿命达到 8000 飞行小时，而且还计划到 2010 年把可更换部件寿命再提高 60%。

几十年来，我国也相继开展了抗疲劳制造研究，并取得了延长构件寿命和提高使用可靠性的效果。例如超高强度钢制造的机翼主梁，疲劳裂纹萌生平均安全寿命采用抗疲劳加工后提高了 5 ~ 7 倍。另如，直升机旋翼桨毂，试验与统计分析得出其 10^{-6} 总风险率下的安全寿命采用抗疲劳加工后提升了一个数量级。飞机起落架可靠性差，采用抗疲劳制造后，疲劳寿命提高提高了 15 ~ 20 倍。不过，类似的研究和应用多限于单项技术和解决个案问题。由于尚未形成抗疲劳制造技术体系，以致用同一合金制造的轴承，接触疲劳寿命不及国外产品的一半。由于现行的“成形”制造不能有效地抑制高强度合金构件疲劳强度应力集中敏感，许多主承力构件不断出现过早的疲劳失效，造成飞机、发动机重大失事和故障。由于缺少抗疲劳制造基础，设计时不得不依靠增大安全系数以保证构件的安全。

国内外的实践证明，抗疲劳制造是解决高强度合金构件疲劳强度应力集中敏感，实现构件长寿命和高可靠使用的根本出路。

在过去几十年中，抗疲劳制造不断创新发展，把构件服役性能提高到了很高的水平。但从上世纪末美国国防部提出了 CAIV（Costasan Independent Variable），即性能与费用同等重要的经济可承受观念后，抗疲劳制造尤显格外重要。伴随着构件高性能、轻量化、小型化、经济可承受性和合金超高强度化的发展，抗疲劳制造必将上升到新的高技术平台。

我国是一个制造大国，飞机、车辆、舰船及其动力装置、各种精密机械都亟需实现抗疲劳制造。我们必须抓住机遇，快速实现抗疲劳制造，提升构件服役性能，并在此基础上创新发展，增强竞争能力。

9.2.3 抗疲劳制造的关键技术

抗疲劳制造的关键技术主要包括以下内容。

（1）表层硬化技术

表层硬化技术是指通过适当的方法使构件表层达到高硬度，心部具有强韧性，以改善构件疲劳、冲击及磨损性能。通常的工艺有：渗碳、渗氮、涂层、表面淬火等。

表层硬化是一类十分有效提高疲劳强度和寿命的技术，是抗疲劳制造技术的核心技术之一，表层硬化是航空轴承、传动齿轮和其他传动构件长寿命、高可靠的主要来源。

（2）抗疲劳机械加工技术

抗疲劳机械加工技术是指控制表面完整性，以疲劳性能为主要判据和提高疲劳强度的制造技术。这项技术是本章要论述的内容之一，精密超精密加工技术是抗疲劳机械加工技术的核心。

（3）表层组织再造改性技术

表层组织再造改性技术是指使构件表层获得与基体材料不同的组织结构、残余应力结构，提高抗疲劳、抗磨损和应利腐蚀，抑制疲劳强度应力集中敏感、应力腐蚀敏感的技术。主要工艺包括：机械、激光、电子束、离子注入、电火花、表层硬化等。这是一项十分有效提高疲劳强度和寿命的技术，是抑制疲劳强度应力集中敏感的主要方法，是航空构件长寿命、高可靠性的主要来源。除了传统的强化工艺外，近年来随着精密加工技术的发展和应用，出现了一些新型的强化工艺，极大地提高了零件的疲劳强度。

（4）抗疲劳装配技术

装配是指根据尺寸协调的原则将零件、组合件或部件采用不同连接方法进行组合连接，形成更高一级产品，并赋予其功能和效用的一类基础制造技术。装配是关键构件表面损伤的重要来源之一，附加应力集中导致疲劳寿命降低，装配经由连接形式、配合精度、结合面状况等引发载荷分布改变和应力集中，导致疲劳寿命降低。为此提出了无应力集中装配技术，该技术是以保证表面完整性为目标，以疲劳性能为主要判据，提高或不降低构件疲劳强度的先进装配技术。

结合面技术是装配的核心，结合面可导致载荷重新分配、结合面可导致高应力集中，结合面是疲劳失效高发区。装配损伤和应力集中包括机械损伤（压伤、划伤等）、腐蚀损伤（酸、湿、汗等）、安装损伤（存储、搬运等）、配合应力（尺寸精度、配合精度、动态精度等）。

零件、部件及产品在装配过程中和装配完成后存在许多未知因素，也没能引起足够的重视，例如装配时关键构件表面损伤不知、配合面接触状态不知、载荷重新分配状态不知、运动状态载荷分配不知等，诸多的未知因素导致部件及产品性能下降。飞机、发动机失效中，70%起因于装配部位，80%以上的装配部位疲劳失效源于连接孔，装配降低了疲劳强度。

装配与关键构件性能无关，但对其服役性能有着决定性的影响。装配对精度极其稳定性的影响已经引起了人们的重视，但对疲劳强度的影响还没有得到充分重视，是航空制造的盲区，可以说装配技术是抗疲劳制造的一个薄弱环节。

（5）整体制坯技术

整体制坯技术是指采用锻压、铸造等先进技术，获得无连接、无内部缺陷、均匀组织、预定方向变形流线和结晶的整体毛坯制件，降低应力集中，提高疲劳寿命。

（6）精密热处理技术

精密热处理技术是指以加热－冷却方式精密控制材料的相变、组织和性能，从而赋予关键构件极限服役性能。该技术的核心是获得和保持构件精密尺寸、精密应力场、精密表层、精密组织等，同时要考虑节能环保。

（7）长效腐蚀防护技术

长效腐蚀防护技术是指隔绝极端环境，保持关键构件极限服役性能，保持长寿命、高可靠，主要包括防热、防辐射、防冲刷、防撞击、防腐等。

（8）疲劳寿命评价与试验技术

疲劳寿命评价与试验技术是指通过试验设备对材料、构件、部件及系统的疲劳特性进行测试及评价，主要包括材料疲劳试验、工艺疲劳实验、元件疲劳实验、轴承疲劳实验、服役反馈、寿命评估体系等，但我国由于受到试验设备条件等限制，目前许多试验还无法进行。

（9）检测技术

抗疲劳制造检测技术是指根据表面完整性数据组指标进行的过程和最终状态的测量测试，主要检测内容包括：表面组织结构检测、显微硬度检测、残余应力检测、表面粗糙度检测、疲劳性能测试、装配检测等。

本章主要内容涉及抗疲劳机械加工、表面强化等表层组织再造改性以及疲劳寿命评价与试验等方面与精密超精密加工技术相关的内容。

9.3 航空构件超高强度钢表面完整性磨削工艺试验

9.3.1 超高强度钢磨削加工热力耦合作用对表面完整性的影响

切削加工过程中，切削力和切削热对加工表面完整性的形成具有重要的影响，加工区域的切削热引起材料温度的升高，材料切削过程如图9－6所示。加工过程导致材料的加工变形，其本质为材料内部的质点发生应变，此过程为瞬时过程时间极短，材料的变形速度快，材料局部变形应变率高，可能出现较大的绝热温升效应，引起材料局部温度急剧升高，进而影响微观组织。所以从微力学角度讲，表面完整性尤其是变质层形成的主要因素

是从热/力耦合作用对组织的影响。由于切削力和切削热的耦合作用使得材料分别在变形区Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ内产生应力、应变，从而使材料发生弹塑性变形，加工完成后的表面依然存在塑性变形以及其它各种表层材料特性的变化，如表面粗糙度、加工硬化、残余应力以及微观组织变化等。可见，加工表面变质层的形成机制主要是加工过程中的热力耦合作用。工艺参数对热力耦合作用的影响，最终决定表面形貌和变质层特征的产生和形成。

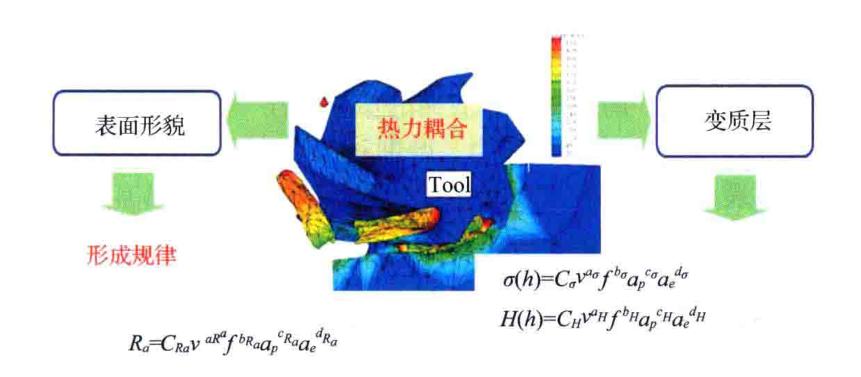


图9-6 表面完整性形成过程示意图

M50NiL、AerMet100以及GH4169等是航空典型难加工材料，其中M50NiL超高强度钢表面渗氮后硬度可达HRC70，并具有较高的断裂韧性，这使它成为航空航天高温传动构件的理想用材，例如可用于航空发动机主轴承的制造。GH4169等高温合金材料在一定温度、一定应力条件下可长期工作，具有优异的高温强度、良好的抗氧化和抗热腐蚀性能、良好的抗疲劳特性、断裂韧性等综合性能，已成为军民用燃气涡轮发动机热端部件不可替代的关键材料。这些材料优良的机械性能为它的精密加工，尤其是热处理后的精密磨削带来了很大的困难。

磨削过程是大量磨粒对工件表面进行切削、刻划、划擦的过程，大多数磨粒的切削是负前角切削，且切削速度很高，同时由于磨削区内具有高压和高温，使得磨削中进入工件的磨削热占总磨削功的比例远远大于其他切削过程，如对于AerMet100的磨削过程，其传入工件的热量占总磨削功的比例在55%～90%，而磨削GH4169高温合金传入工件表面的热量也占总磨削功的20%～55%，这使得磨削中工件表面的宏观温度非常高，采用SA60-J6砂轮磨削AerMet100，温度可达600°C，而采用SA80-K6砂轮磨削GH4169高温合金时，宏观温度可达800°C以上。另外，通过单颗磨粒切削过程的数值仿真，可以发现，在磨粒直接作用的GH4169高温合金工件表面局部微观温度可达1200°C，而作用于AerMet100工件表面的微观局部温度也在700°C以上。

在磨削热和磨削力的综合作用下，被加工材料表层产生塑性变形，使晶格扭曲、晶粒被拉长呈纤维化，甚至碎化，这使得表面层产生硬化，导致硬度提高，塑性降低，同时表面也受到切削热作用，其会使塑性变形产生恢复和再结晶，失去加工硬化，导致表面软化，表面最终的硬化程度取决于磨削温度作用与磨削力作用的综合效果，而此效果又取决于被加工材料的物理性质。如GH4169高温合金，其导热率较低，而膨胀系数在金属材料中相对较大，采用平面切入磨削试验时，当磨削深度为0.040mm时，表面呈现出软化结果。对于AerMet100高强度钢，其导热率为46W/mK，相对较大，且热膨胀系数明显小于

GH4169 高温合金，通过模拟，传入工件的热量占总磨削功的比例较 GH4169 高温合金大，虽然磨削温度相对较低，但仍然使表面发生软化现象。

磨削表面残余应力取决于磨削温度场、磨削磨粒机械作用以及因机械作用和磨削热造成的组织变化。磨削热作用于工件表面时，在热胀冷缩的作用下，表面的材料膨胀，由于受到底层基体材料的限制，从而在表层形成压应力，而底层形成拉应力，同时由于材料的温度升高，此时材料的屈服点因温度升高而降低，当热应力超过材料的屈服点后，表层金属材料就会产生压缩塑性变形，随着磨削过程的继续，表层金属受到冷却产生收缩，但由温度的降低，屈服点上升，此时已发生的塑性变形无法恢复，从而导致表层应力状态由压转拉，最终形成残余拉应力。磨粒对工件表面的切削过程一般都为负前角切削，一般认为负前角切削过程将在表面产生残余压应力。磨削过程中由于材料有温升同时存在塑性变形，这可能导致磨削表面的材料发生金相转变，不同组织的比容具有区别，若转变后的组织比容大，则在工件表面产生残余压应力，反之则产生残余拉应力，此部分残余应力一般称为组织应力，至于工件磨削后的残余应力状况如何，取决于以上三种作用的综合效果。

根据目前研究结果，GH4169 高温合金磨削过程中表面温度较高，且其热膨胀系数较大，因此在磨削量比较大的时候容易在表面形成残余拉应力，而当磨削量小的时候，则磨粒的机械作用产生的残余应力占优势地位，此时工件表面容易形成残余压应力。对于 AerMet100，其磨削温度相对较低，因此一般不会产生热残余应力，反而磨粒的机械作用较为明显，同时其表面容易产生因相变造成的组织应力。磨削 AerMet100 获得的残余应力以压应力为主。

①磨削力大：M50NiL 具有高强度，则其在磨削时的滑擦、耕犁以及切削中的变形抗力也必然很大。所以，磨削超高强度钢 M50Ni 时的磨削力很大。

②磨削温度高：因为材料含有一些合金元素，使得 M50NiL 的导热率大大降低。而由于磨削力大，并且磨削时所消耗的机械功 99% 以上转化为热量，所以 M50NiL 磨削时会产生大量的热。磨削区产生的大量热由于低导热率很难导出，从而造成了磨削温度过高。

③容易产生磨削烧伤：由于磨削温度高，所以磨削时极易产生磨削烧伤。若不优化磨削参数、严格控制磨削条件，则极易产生磨削烧伤。

9.3.2 M50NiL 超高强度钢表面完整性磨削工艺试验

精密磨削加工中，影响表面完整性加工工艺因素众多，本节以平面试样精密磨削为例，主要探索了砂轮粒度、磨削深度（a_p）、砂轮速度（v_s）、工件速度（v_w）等因素对表面粗糙度、表面残余应力及显微硬度的影响。

（1）砂轮粒度及磨削深度对表面粗糙度和表面残余应力的影响

分别用 46#，80#，150# 砂轮，砂轮转速 1500r/m（ϕ200mm）的速度，横向进给量 5mm/str，工件速度 16.7m/min 的条件对渗碳/氮 M50NiL 工件进行不同磨削深度的磨削加工。

磨削深度与表面粗糙度关系曲线如图 9－7 所示。对于同一个砂轮，在同样的加工参数下，随着磨削深度增加，表面粗糙度越大。而对于渗氮 M50NiL 在同样条件下，随着砂轮粒度的增加，表面粗糙度逐渐降低。渗氮元件磨削后的表面粗糙度值较渗碳元件要小。

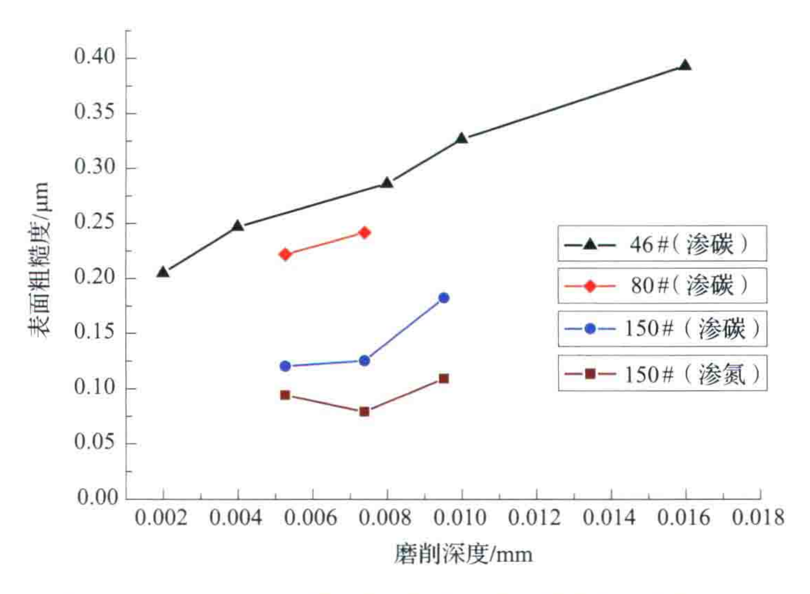


图 9－7　不同砂轮粒度下磨削深度与表面粗糙度的关系曲线

磨削深度与表面残余应力关系曲线如图 9－8 所示。当砂轮粒度为 46#和 80#时，加工渗碳元件磨削过程中，增大磨削深度会使得表面残余应力缓慢增加，当磨削深度减小到 0. 008mm 时表面残余应力开始一个猛增，在 0. 008mm 到 0. 010mm 之间，表面残余应力有一个阶跃变化，从－170MPa 激增到－48. 7MPa，肉眼可见工件表面出现烧伤痕迹，当磨削深度大于 0. 010 开始往后表面残余应力又恢复到随磨削深度增大增加缓慢；当砂轮粒度为 150#时，渗碳元件和渗氮元件磨削过程中，随着磨削深度的增加表面残余应力以压应力形式增加。

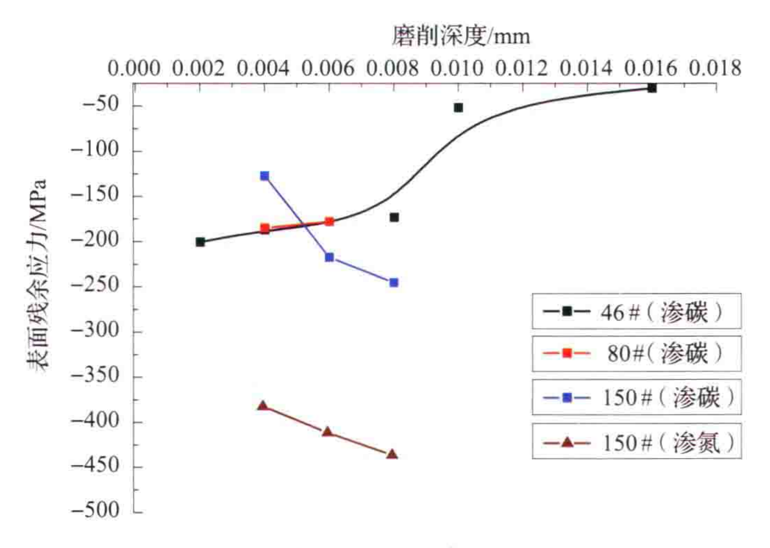


图 9－8　磨削深度对残余应力的影响

（2）工件速度对表面粗糙度及残余应力的影响

试验用砂轮粒度为 80#，磨削深度为 0. 004mm，砂轮速度为 17. 5m/min，砂轮进给量为 2mm/str 的条件对渗氮材料元件以不同工件速度进行加工。

工件速度对表面粗糙度的影响如图 9－9 所示，由图可以看出表面粗糙度随工件速度

的增加而增大。工件速度对表面残余应力的影响如图 9－10 所示，从图中可以看出随工件速度增加表层残余应力以压应力形式增大。

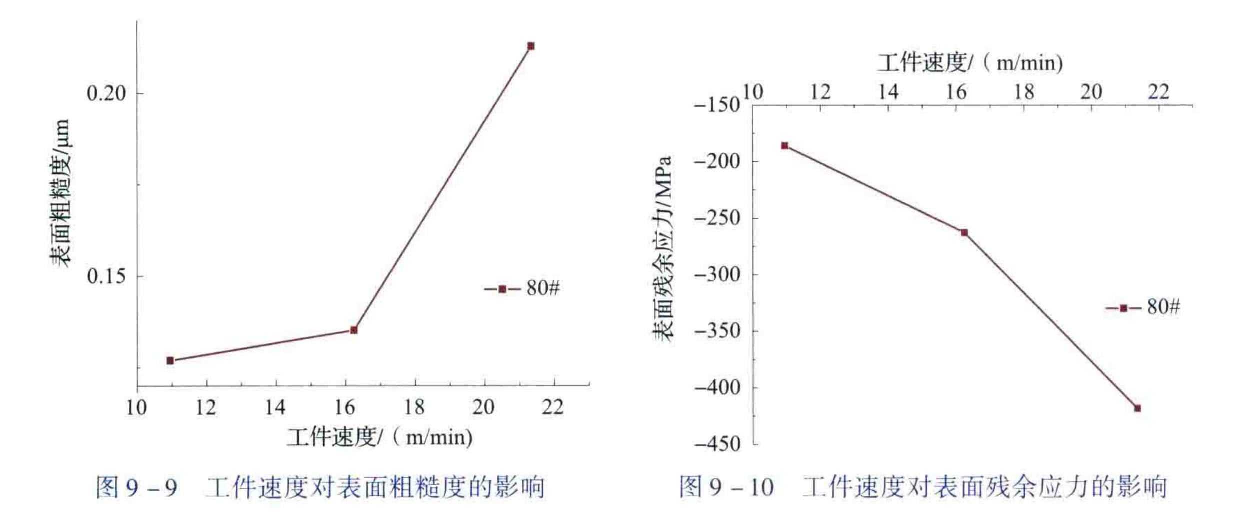


图 9－9　工件速度对表面粗糙度的影响　　图 9－10　工件速度对表面残余应力的影响

（3）砂轮速度对表面粗糙度及残余应力的影响

用 80#粒度砂轮，对渗碳和渗氮工件进行不同砂轮速度下的磨削试验。砂轮速度与表面粗糙度关系如图 9－11 所示，由图可以看出，随着砂轮速度的增大，表面粗糙度降低。砂轮速度与表面残余应力关系如图 9－12 所示，由图可以看出，随着残余应力的增大，表面残余应力变化不大。

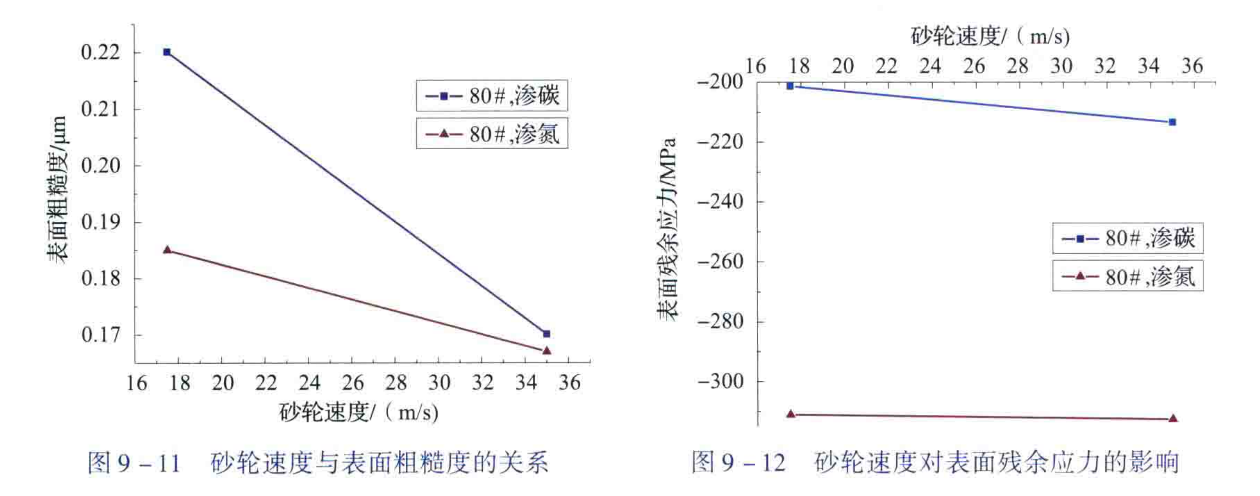


图 9－11　砂轮速度与表面粗糙度的关系　　图 9－12　砂轮速度对表面残余应力的影响

（4）砂轮横向进给量对表面粗糙度与表面残余应力的影响

试验用砂轮粒度为 46#，磨削深度为 0. 004μm，砂轮速度为 17. 5m/min，工件速度为 11m/min 的条件对渗氮材料元件加工后，测量工件的表面粗糙度和表面残余应力。

试验用砂轮粒度为 150#，磨削深度为 0. 002μm，砂轮速度为 17. 5m/min，砂轮进给量为 11m/min 的条件对渗氮材料元件用不同工件速度进行加工后，测量工件的表面粗糙度和表面残余应力。砂轮横向进给量对表面粗糙度的影响如图 9－13 所示，由图可以看出，使用 46#砂轮进行磨削时，增大砂轮横向进给量则表面粗糙度变大。砂轮横向进给量对表面残余应力的影响如图 9－14 所示，表面残余应力随砂轮进给速度的增大而增大。

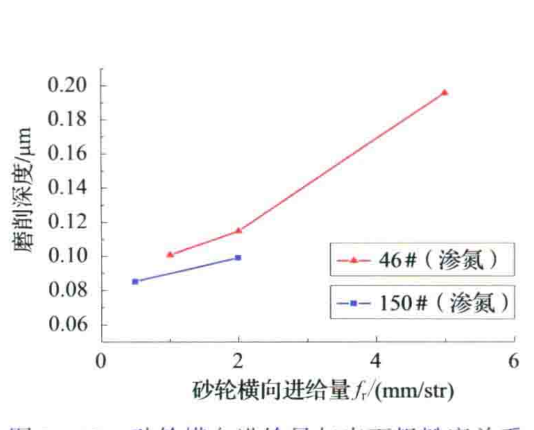


图 9 - 13 砂轮横向进给量与表面粗糙度关系

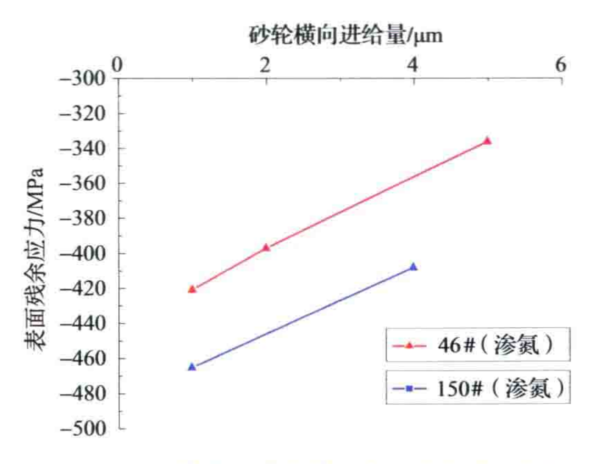


图 9 - 14 砂轮横向进给量与表面残余应力关系

综合以上试验结果，可以看出，对于平面样件为了得到尽可能高的表面粗糙度和较大的表面残余压应力，最佳磨削方案是磨削深度在 2μm 到 5μm 之间，工件速度在 12m/min 到 18m/min 之间，砂轮速度在砂轮强度和机床刚度允许的条件下尽可能的高，砂轮横向进给量根据工件材料的硬度不同适度选择，硬度大的材料进给量应适当减小，砂轮粒度的选择可以根据上一步加工后的余量定。

（5）磨削参数对显微硬度场的影响

以渗氮 M50NiL 为加工对象，研究磨削参数对材料表面显微硬度的影响，结合前面磨削参数对表面粗糙度及残余应力的影响规律，对各参数对表面完整性的影响综合分析。

①砂轮粒度对显微硬度的影响

试验分别用 46#、80#、150#砂轮以磨削深度 0.004mm，工件速度 11m/min，砂轮速度 1500r/m，砂轮进给量 2mm/str 加工试件，并测量试件表面显微硬度场。

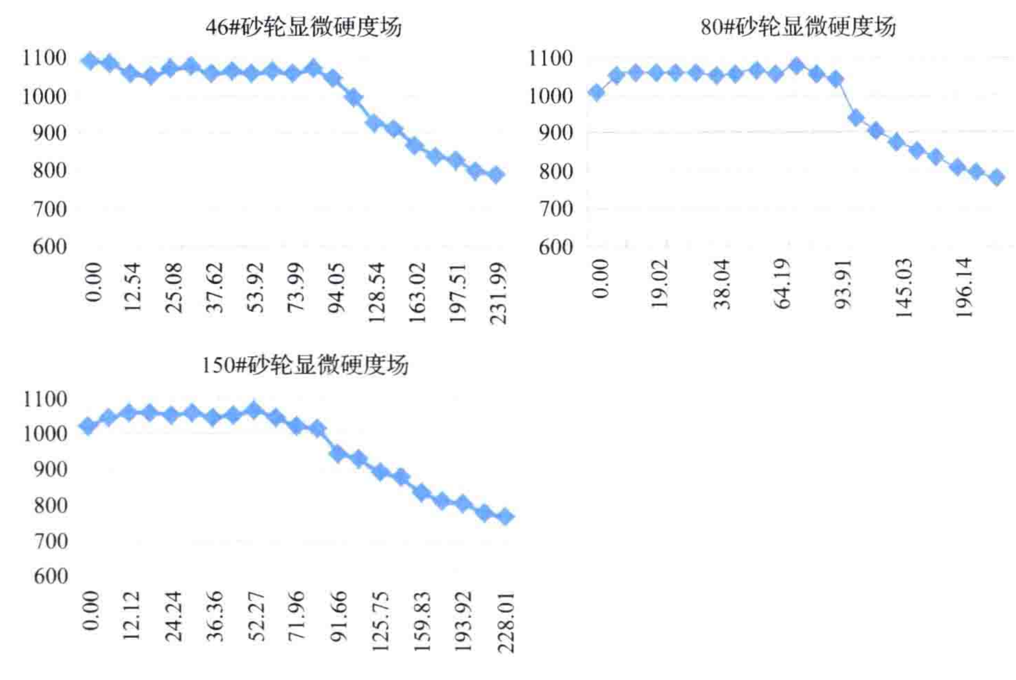


图 9 - 15 不同粒度砂轮对显微硬度场的影响

从图 9 – 15 中可以看出使用 46#砂轮加工的试件，表层显微硬度最高，达 HV1100，而 80#和 150#砂轮表层显微硬度明显要低于 46#砂轮。这说明使用 80#和 150#砂轮加工的试件表面由于磨削热较大，降低了表面的显微硬度。所以，虽然表面粗糙度会随砂轮粒度变小而降低，但是砂轮粒度过小在磨削高硬度材料时，容易造成工件表面的过热甚至烧伤。所以磨削参数选择时，尽量选择粒度大的砂轮对 M50NiL 复合渗碳—氮工件进行加工。降低工件在磨削中发生表面过热或者烧伤风险。

其次，从 80#和 150#砂轮加工的试件表面显微硬度场变化可以看出，磨削温度高引起显微硬度变化的影响深度应该在 6 ~ 10μm 左右。所以如果在后期加工中可以去除 10μm，可将高温引起表面显微硬度降低的影响层去除。

另外，从三个试件的显微硬度场变化曲线可看出，表面至 70μm 深处的显微硬度维持在同一水平。故加工时，为使工件表面显微硬度保持在最佳状态，加工去除量不能大于 70μm。

②磨削深度对显微硬度的影响

试验分别以磨削深度 0. 004μm、0. 006μm、0. 008μm，砂轮粒度 150#，工件速度 11m/min，砂轮速度 1500r/m，砂轮进给量 1mm/str 加工试件，并测量试件表面显微硬度场。

从图 9 – 16 中可以看出，三种磨削深度加工的试件的表面显微硬度区别不大，都在 1050 左右。这说明在砂轮进给量合适的情况下，磨削深度的变化对工件表面显微硬度的影响不大。

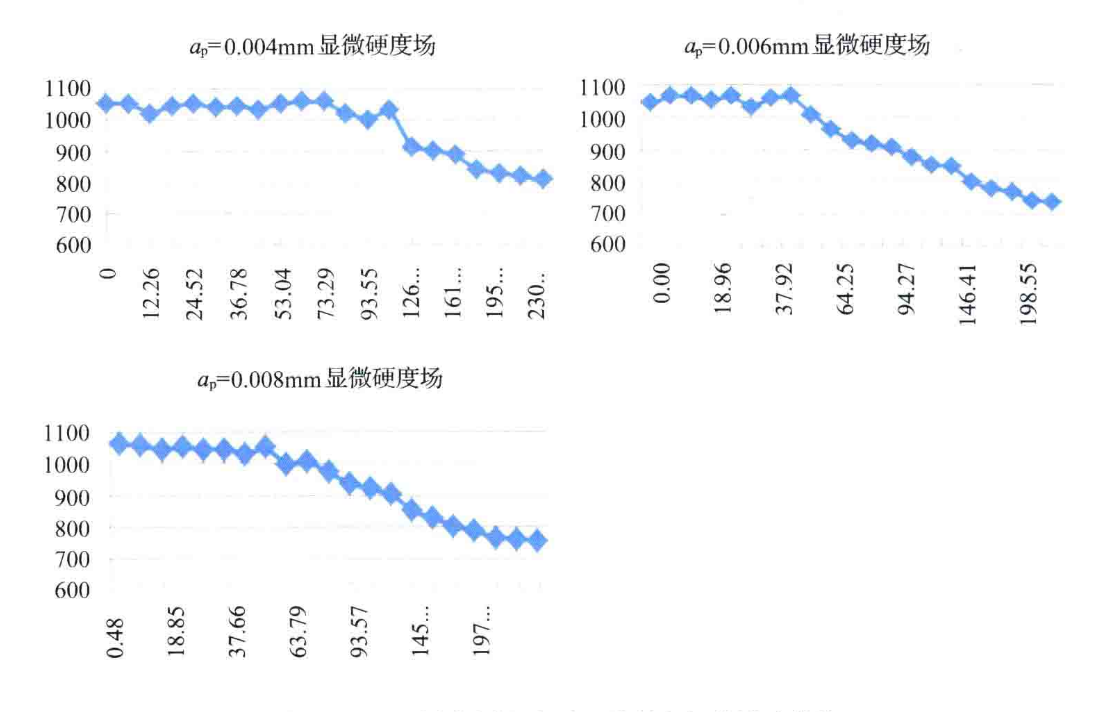


图 9 – 16　不同磨削深度对显微硬度场的影响曲线

③砂轮进给量对显微硬度的影响

试验分别以砂轮进给量 0. 5mm/str、2mm/str，砂轮磨削深度 0. 002mm，砂轮粒度 150 #，工件速度 11m/min，砂轮速度 1500r/m 加工试件，并测量试件表面显微硬度场。

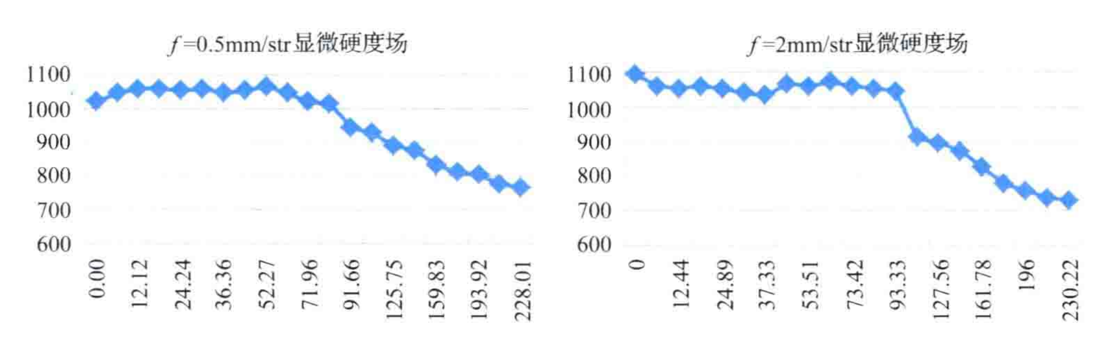


图 9 - 17　砂轮横向进给量对显微硬度的影响

如图 9 - 17 所示，对比砂轮进给量 0.5mm 和 2mm 的工件表面显微硬度场变化曲线，发现，在砂轮进给量为 2mm/str 时，工件表面显微硬度降低。所以在加工时，应选择较小的砂轮进给量，以避免工件表面因发生烧伤而致表面显微硬度降低的情况。

（6）磨削参数对残余应力场的影响

试验分别用 46#、150#砂轮以磨削深度 0.004mm，工件速度 11m/min，砂轮速度 1500r/m，砂轮进给量 2mm/str 加工试件，并测量试件表面残余应力场。

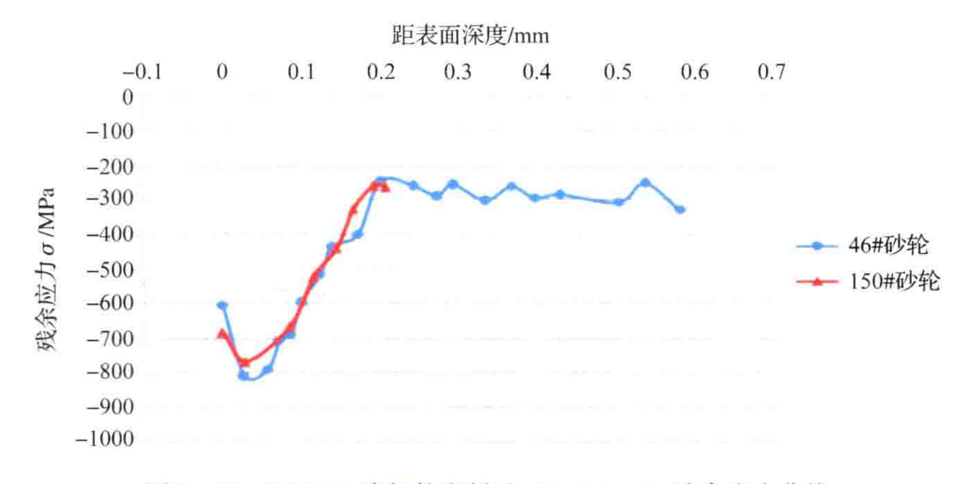


图 9 - 18　M50NiL 渗氮件磨削后（Ra0.2um）残余应力曲线

从上图可知，渗氮 M50NiL 渗氮层的残余应力场先随深度增加而增加，到达一定深度（约 0.03mm）后，残余应力场压应力随深度增加逐渐减小，在 0.2mm 左右达到稳定值。不同砂轮对表面残余应力的影响较大，而对一定深度下的残余应力场的影响较小。残余应力场的变化曲线主要取决于渗氮层的深度的影响。

9.4　表面强化新工艺

表层改进抗疲劳制造技术是指在不改变零部件材料和截面尺寸的前提下，通过在制造工艺过程中改变材料的组织及应力分布状态来提高零部件疲劳寿命的制造技术。该技术的一个突出特点是不改变零部件的结构和材料，不增加重量，但能够大幅度提高零部件的疲劳寿命，对于像航空航天、铁路运输、核工业等对疲劳要求很高的工业领域，抗疲劳制造技术的应用显得尤为重要。

9.4.1 表层改性的方法

表层改性技术是最有效的方法，在目前的生产实践中，主要包括物理、化学、机械和高能束处理等。

（1）物理方法

物理方法是指通过提高材料表层的硬度和强度来提高材料抗疲劳性能的，其特点是不改变表层化学成分，通过表层相变来提高零件的疲劳强度。常用的工艺有火焰淬火、高频和中频感应加热淬火以及近年来发展的超声波、双频感应加热淬火等。表面淬火淬硬层中的马氏体组织很细，硬度和强度比一般的整体淬火高，因而具有较好的抗粘着磨损与疲劳磨损的能力。马氏体的比容大，使淬硬层中存在较大的残余压应力。这种具有残余压应力的高硬度表面层能使工件的疲劳强度明显地提高。

（2）化学方法

化学方法是利用化学热处理技术通过改变表面化学成分，并形成单相或多相的扩散层，大大提高材料表层的硬度，同时还可以建立很高的残余压应力，从而提高了材料的疲劳性能，主要包括渗碳、渗氮、碳氮共渗、磷化和阳极氧化等工艺，近年来离子渗碳、真空扩渗、渗硼和多元共渗等新方法也得到了较大的发展并且在微动摩擦学领域中进行了较多应用。国外相关人员研究了渗氮层的微动性能，发现其表面损伤程度随表机械强度的提高而降低，特别是残余压应力和较高的屈服强度降低了表面承受的有效载荷，使裂纹形核时间延长，扩展速率降低，因而磨损减小，微动疲劳性能大大提高。

（3）机械方法

机械方法的突出特点是利用冷变形技术，使金属材料表面产生形变硬化层，并引人高的残余压应力，因而减少了疲劳应力作用下裂纹的形核并抑制裂纹的早期扩展，从而显著提高机械零件的抗疲劳断裂和抗应力腐蚀开裂的能力。主要工艺方法包括滚压、挤压、喷丸、干涉配合和抛光处理等，是抗疲劳制造的一种主要方法。其中喷丸强化工艺不仅可以在极为宽广的幅度上改变金属材料的疲劳强度和抗应力腐蚀性能，而且其适应性也极为广泛，在航空工业中，孔冷挤压强化工艺包括芯棒挤压和开缝衬套挤压技术，已广泛地应用于航空工业发达国家的军机和民机，而包括冷挤压在内的干涉孔配合工艺更是大大促进了这种工艺的成功应用，其抗疲劳效果更为显著。

（4）高能束处理

高能束处理技术是在材料局部表面施以极高密度的能量，并使之发生物理、化学变化，达到显著抗疲劳增寿的目的。高能束处理的作用在物理、化学、机械等方面都能得到体现。单独将其作为一类是因为高能束能景密度极高的特性，使得经高能束处理方法得到材料抗疲劳性能比传统方法有显著地提高，其发展应用前景极为广阔。目前正在研究和应用于抗疲劳制造的有激光冲击、激光相变硬化、激光熔凝、激光合金化以及离子注入等，这些是极有发展前途的抗疲劳制造方法。激光相变硬化工艺不改变物质的状态，强化后材料表面仍很光滑，变形也很小，同时处理后的表层内应力为压应力，对材料的疲劳性能有很大的提高，有较大的技术经济效果。

通过实验发现，ALSI1045 钢旋转弯曲光滑试样进行的激光相变硬化抗疲劳试验表明：用 475W 激光束以 2.07mm/s 速度扫描可获得 100μm 厚的硬化层，疲劳寿命提高约 30%。

激光冲击能有效提高地强化碳钢、合金钢、不锈钢、可锻铸铁、球墨铸铁、铝合金，以及镍基高温合金的性能，在提高金属材料疲劳寿命方面，激光冲击已能取代喷丸处理。离子注入通过在材料中引入固溶强化、析出强化和压应力来提高材料的抗疲劳寿命。在精密零件的抗疲劳措施中，离子注入有着重要的作用。因为离子注入一般在较低的温度下在真空中进行，离子注入后零件尺寸精度和表面粗糙度能保持原状。但是离子注入零件尺寸较小，厚度不超过1μm，所以离子注入应用受到一定限制。

9.4.2 超声振动复合强化工艺

超声振动复合强化就是利用复合能量加上机械碾压的塑性变形，大幅度降低工件表面粗糙度，减小或消除加工刀痕和划伤等应力集中点，减小应力集中系数及缺口效应，同时细化金属晶粒、提高工件的表面显微硬度，消除拉应力，预置压应力，最终提高工件的疲劳性能，延长工件的疲劳寿命。

(1) 超声振动强化的原理

超声振动表层复合强化系统是通过高频振动的超光滑滚动体对零件工作表面施加一定的静载荷，并且进行高能冲击，通过对被强化表面进行路径轨迹规划及自动控制技术，在工件表面产生一定深度的强化变质层，而且对工件表面粗糙度的影响非常小或者有所改善，如图9-19所示。它弥补了喷丸强化处理技术的缺点，可实现轴承零件表面的确定性强化改性处理，能极大地提高零件的抗疲劳性能，同时能够提高被强化零件的表面质量。

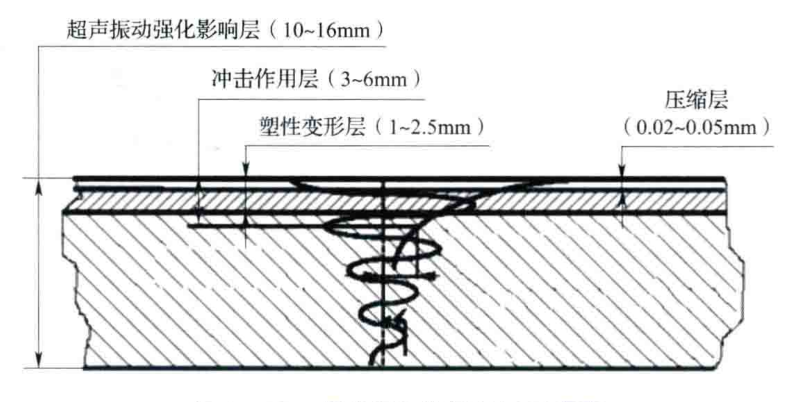
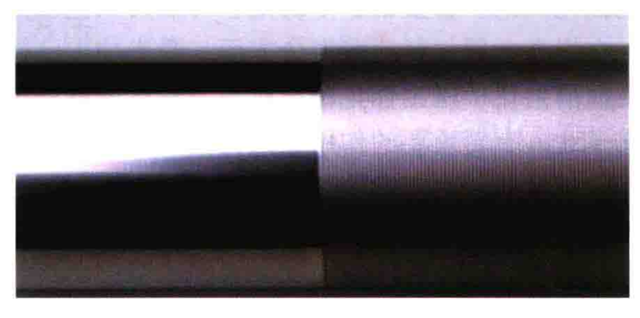


图9-19 超声振动能量作用示意图

超声振动能量是指一种由电能转换、高频（频率高达30kHz）、高能量密度且振幅很小的超声波机械能和冲击激活能的复合能量。其作用原理是利用了金属在常温状态下的冷塑性特点，运用这种复合能量对金属零件表面进行无研磨剂的研磨、强化和微小形变处理，使金属零件表面达到更理想的表面粗糙度要求，也可以形象的说是利用超声强化技术将零件的表面熨平；同时在零件表面产生压应力，细化金属晶粒提高零件表面的显微硬度、耐磨性及耐腐蚀性，延长疲劳寿命。

(2) 超声振动强化对零件表面粗糙度的改善

超声振动强化可以将金属表面的粗糙度提高3个等级以上，可达*Ra*0.1μm以下，加工效果和效率都超过了传统的磨削和抛光，如图9-20所示在车削表面的基础上经超声振动强化工艺后的40Cr钢工件表面对比情况。对表面粗糙度测定，精车后的表面粗糙度为*Ra*3.2μm，经强化后*Ra*0.05μm，达到了镜面的效果。

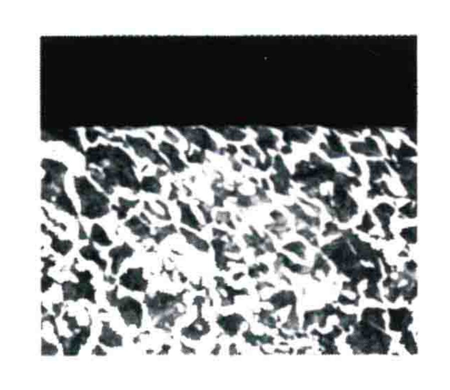


（a）超声振动强化试样表面　　（b）精车试样表面

图 9－20　40Cr 超声振动强化前后表面波粗糙度的对比

（3）超声振动强化加工可以实现金属晶粒细化，并提高表面显微硬度

图 9－21 是在电子显微镜观测超声振动强化处理前后样品横断面金相组织照片，可以明显看出，经超声振动强化表面处理后，金属表层的金属晶粒得到细化，组织更加致密。同时使用 MHV2000 显微硬度测量仪分别对处理加工和原始样品沿厚度方向硬度变化进行方向变化对比测量（施加载荷 200g，保持时间 10s），结果如图 9－22 所示。



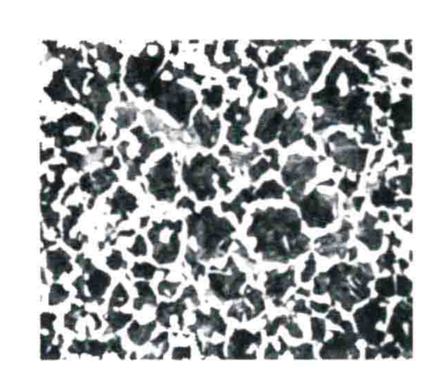


图 9－21　超声振动强化后试样横断面金相组织对比

从图 9－21 中可以看出，超声振动强化处理后该样品表面硬度明显增大，且随深度增加表面硬度逐渐减小并趋于稳定。硬度提高可归因于晶粒细化和加工硬化两种效应共同作用的结果。由样品组织与性能对应关系可以看出，晶粒尺寸沿样品厚度方向逐渐增大，而硬度逐渐减小，这种现象与传统 Hall－Petch 关系一致，也与其它超细晶材料相符，因此可以确定金属表面结构细化对材料表面强化可以起到重要作用，更为可贵的是在所有金属强化方法中，细化晶粒是目前唯一可以做到既提高强度，又改善塑性和韧性的方法，因此，超声振动强化对金属表面的强化可大幅度提高机械零部件的抗疲劳和耐磨损性能。

（4）超声振动强化可以消除工件残余拉应力并获得数值可控的高值压应力

高数值残余压应力可以大幅度提高机械零部件的抗疲劳性能和耐磨损性能。分别对 40Cr 材质的相同规格的轴进行超声振动强化和磨光处理，使表面粗糙度都达到 $Ra0.2\mu m$ 以下，然后对工件的表面残余应力进行测试。图 9－23 中测试结果表明，工件经磨光后试件表面也产生了一定数值压缩应力，但数值较小且厚度相对较小；而超声振动强化处理后在金属表面所形成的残余应力较高，影响的深度也明显加大了许多。

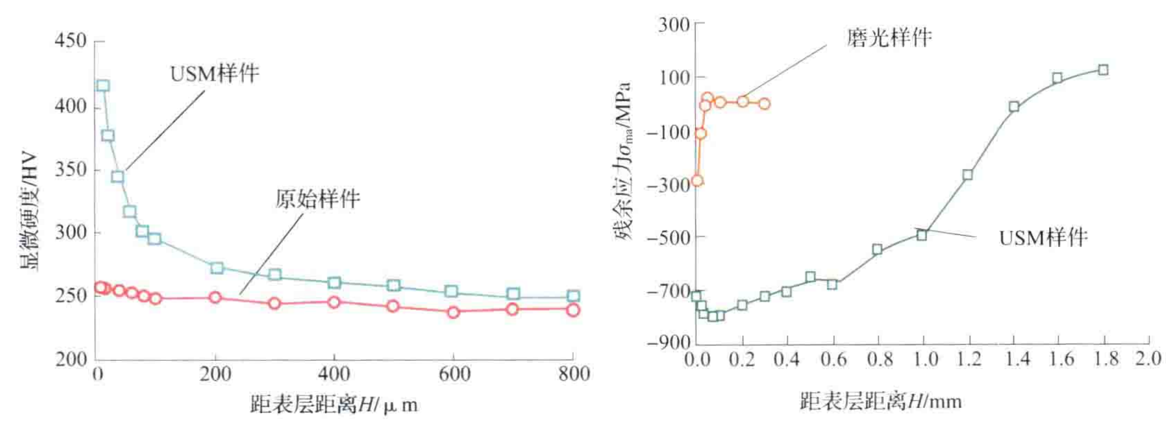


图9-22 两种样件沿深度方向硬度的变化　　图9-23 两种样件沿深度方向残余应力的变化

（5）超声振动强化可大幅度提高零件的疲劳寿命

试验对象为两组45钢试样，每组7根；试验标准是GB 4337—1984金属旋转疲劳试验方法；试验设备使用的是莫尔型纯弯疲劳试验机。试验数据如表9-3所示，可以看出在循环应力水平为380MPa时，未经过超声振动强化处理的试样，有效的7根全部发生疲劳断裂，寿命只有几十万至百万次；经超声振动强化处理的7根试样，寿命全部通过了1000万次，很好地验证了工件经过超声振动强化处理可以大幅度提高材料的疲劳性能。

表9-3 两种试样试验数据对比表

未经过处理的试样			超声振动强化处理试样		
序号	直径/mm	循环次数 N	序号	直径/mm	循环次数 N
1	7.02	1.193×10^6	8	7.01	$>1.0\times10^7$（通过）
2	7.02	5.82×10^5	9	7.02	$>1.0\times10^7$（通过）
3	7.01	6.51×10^5	10	6.99	$>1.0\times10^7$（通过）
4	7.00	1.594×10^6	11	7.02	$>1.0\times10^7$（通过）
5	7.02	1.339×10^6	12	7.01	$>1.0\times10^7$（通过）
6	6.98	4.56×10^5	13	7.01	$>1.0\times10^7$（通过）
7	6.98	3.28×10^5	14	7.02	$>1.0\times10^7$（通过）

综合以上各点，超声振动强化处理技术在工件抗疲劳制造中能合理控制金属表面完整性指标，强化金属表面质量，通过超声振动强化能同时影响多方面的因素来达到提高工件疲劳强度，延长工件疲劳寿命的目的。

9.4.3 超声振动强化工艺在抗疲劳制造中的应用

我国是轴承生产大国，但并非轴承生产强国。据不完全统计，2009年我国轴承行业产量达100亿套，总产值达900亿元，但进出口逆差超过8亿美元，2010年全年逆差也高达5亿~6亿美元。进口轴承垄断我国高端轴承市场。美国、日本、德国、瑞典

8 家大型轴承企业占据世界轴承销售额的 75% ~80%。我国 1000 多家轴承企业销售额约占全球销售额的 10%。我国轴承行业虽然产量高，但普遍使用寿命低，属于低端产品，而高级轴承，如风电、高速列车等行业使用的高档轴承全部依赖国外进口，除了材料、加工工艺以外，对轴承工作表面的强化技术一直未能取得突破也是一项重要的原因。

我国航空发动机主轴承使用寿命与国外轴承相比小一个数量级，这充分说明我国轴承的质量远不如国外同尺寸型号的轴承，这一事实值得我们思考。有科研人员通过国内外轴承元件相关参数的对比发现，国内外轴承的尺寸精度、形状精度都基本接近，但相同的材料，国外轴承的工作表面残余压应力值较国内轴承工作表面的残余压应力值要高，而且工作表面显微硬度的均匀性要好于国产轴承，而较高的残余压应力和均匀的表面显微硬度有利于提高轴承工作表面的疲劳寿命，因此，轴承行业要提升技术含量，发展长寿命高端轴承，除了在材料的选用、加工工艺参数的控制等方面进行改进，迫切需要研究新型的表面强化技术以改善轴承工作表面的性能，从而进一步提高轴承的设计及使用寿命。

为了延长轴承元件疲劳裂纹的萌生寿命或提高萌生疲劳裂纹的载荷水平，在提高轴承材料本身质量的基础上，重要的是如何提高轴承元件表面的质量和性能。最有效的方法之一是改变材料（零件）的表面完整性（主要包括表层的显微组织及相结构、残余应力状态等）。目前改善钢铁零件表面性能的主要方法有：

①金属材料表面的功能性镀覆：包括化学镀、电镀、复合镀、电刷镀及非晶化处理等。

②金属材料表面的高能束处理：包括激光表面处理、电子束表面改性处理及离子注入技术。

③金属材料表面的气相沉积技术：包括物理及化学气相沉积法。

④金属材料表面的热扩散渗入工艺：包括渗碳、渗氮及碳氮共渗等化学热处理。

⑤表面淬火：如高频表面淬火、火焰表面淬火等。

⑥冷作硬化处理：如喷丸、滚压、冷压冷轧等工艺。

上述方法均是通过改变材料的表面完整性来达到改善疲劳性能的目的。几十年来，表面强化 - 表面改性技术的研究和发展已经异军突起，成为材料学科和摩擦学学科中的一个非常突出的应用领域。当今世界各国在工程上已经采用的各种改善材料疲劳性能的诸多表面处理工艺中，使用最多、适应性最广、成本最为低廉的是表面喷丸强化工艺。

目前，轴承内外套圈工作表面的强化工艺主要应用的是喷丸强化工艺，喷丸技术已经相当成熟，被广泛应用于各行业零件的表面强化处理工艺中，其主要特点是利用喷枪喷出的无数微小的高速弹丸冲击到零件表面，从而在零件表面形成一层强化层。但是此种工艺技术存在一些缺点，即被强化零件表面的强化层覆盖不均匀，强化层深度不够，零件表面粗糙度受到影响，零件尺寸精度降低等。

而轴承滚动体（钢球）表面强化工艺是利用研制的专用滚筒机，依靠滚筒的旋转使得装入其中的钢球相互碰撞，从而达到表面强化的效果。此种强化工艺的优点是简单易行，生产效率高，经济效益高。但该方法也存在诸多缺点，对于精度要求高的轴承钢球，此种表面强化方法具有不确定性，不能保证钢球表面均匀强化，而且此种方法极易产生钢

球表面划伤，影响表面粗糙度，并且对于某些硬脆材料的钢球，采用钢球之间相互碰撞的方法进行表面强化，在碰撞冲击力的作用下极易在表面产生微小裂纹，这样反而降低了钢球的抗疲劳寿命。

轴承新型表层复合强化系统是通过高频振动的超光滑滚动体对轴承零件工作表面施加一定的静载荷，并且进行高能冲击，通过对被强化表面进行路径轨迹规划及自动控制技术，在工件表面产生一定深度的强化变质层，且对工件表面粗糙度的影响非常小，因此该表层强化技术能够在轴承精加工后采用。它弥补了喷丸强化处理技术的缺点，可实现轴承零件表面的确定性强化改性处理，能极大地提高轴承零件的抗疲劳性能，同时能够提高被强化零件的表面质量。

针对我国航空工业、交通、能源等行业高档轴承严重依赖进口，国内轴承寿命、可靠性存在技术瓶颈，不能满足市场需求的问题，利用超声振动复合强化技术基础，结合高档轴承生产流程，研制新型精密复合强化智能制造单元，可有效提高我国高档轴承的寿命及可靠性。精密复合强化智能制造单元需要突破的关键技术主要包括：

①滚动体在高速重载条件下的轨迹规划方法及表面展开技术；

②基于滚动体表层确定性均匀强化的变速关联控制技术；

③轴承内外圈强化装备多虚拟轴线精密对心技术；

④轴承内外圈强化自适应精密快速装卡系统的设计及制造技术；

⑤轴承零件表面微小缺陷光学扫描检测方法与快速识别技术；

⑥强化、机器人控制及快速分选的系统集成技术。

此外，超声振动复合强化工艺还可以用于机匣、拉杆等航空、航天关键构件的应力状态改变，消除残余拉应力、提高压应力，从而提高表面质量、提高疲劳强度。超声振动复合能量技术是目前最彻底消除残余拉应力，并产生出理想压应力的工艺方法之一。利用该技术能直接针对焊缝、焊趾、热影响区进行冲击处理，有效改善焊趾的几何形状，将焊缝、焊趾处的余高、凹坑和咬边冲击成圆滑的几何过渡，大大降低焊趾的应力集中系数，从而大幅度提高焊接接着点的疲劳强度和疲劳寿命。另外还有局部的强化处理，消除残余拉应力，预置良好的压应力，改变原有的应力场，明显减少焊接变形，大幅度提高金属在腐蚀环境下的抗腐蚀能力。

9.5　轴承滚动体接触疲劳测试试验设备

9.5.1　概述

航空发动机轴承载荷大、转速高、工作环境复杂，易产生失效，其典型的失效形式是滚动接触疲劳。滚动接触疲劳失效的理论基础是赫兹理论，是在低于材料抗拉强度的交变应力持续作用下微裂纹形核，并逐渐演化成宏观裂纹以及裂纹扩展，最终导致构件失效的过程。

一旦轴承疲劳失效形成，后果特别严重，往往会造成飞行事故。而我国航空发动机轴承、传动齿轮等关键部件的性能、质量、寿命是长期以来的“老大难”问题。为了提高航空发动机轴承的耐磨性能和疲劳寿命，需要选用新材料，探索新工艺；

但对于新材料和新工艺，需要大量的疲劳试验基础数据，为轴承设计和寿命评估提供依据。

目前，国外已经研制出许多疲劳试验设备，这些设备通常是用来开展材料摩擦学试验、接触疲劳试验等适用面较广的通用多功能设备。但是，这类设备对于专类试验又往往存在着适用的工作模态方式、性能参数等工作域范围很有限的问题，常常不能满足试验研究的要求，并且这类通用产品的价格也非常昂贵。

从 20 世纪 50 年代末起，为了发展先进的航空发动机，NASA 资助通用电气公司，解决关键的航空轴承材料、制造、润滑技术，专门研制相应的疲劳试验设备，可快速、高效、低成本地开展材料接触疲劳性能试验，对美国发展和拥有全球领先的航空发动机制造技术发挥了非常重要的作用。

我国在这方面也开展了相应的工作，洛阳轴承研究所研制过此类似设备，并开展了部分钢球或陶瓷球的疲劳试验。但是，由于其载荷小、转速低，仅能做 1/2in（ϕ12.7mm）球的疲劳试验，不能满足航空发动机主轴承大载荷、高转速、大钢球（不小于 7/8in）的疲劳试验，尤其是不能满足航空发动机主轴承超硬化、长寿命接触疲劳试验的需求。

为了更好地开展抗疲劳表面完整性制造基础研究，获得高档轴承尤其是航空发动机主轴承寿命及可靠性的数据和规律，解决高 DN 值、长寿命轴承材料、制造及配合中存在的问题，需要对高强度构件接触疲劳性能测试的精密、高效专用试验检测系统研究，并进行轴承滚动体寿命测试。

轴承元件接触疲劳试验方法一般分为：滚柱接触疲劳试验、推力片滚动接触疲劳、球滚动接触疲劳，试验机原理如图 9－24 所示。本节主要介绍滚柱接触疲劳试验机及球滚动接触疲劳试验机的原理及关键技术。

9.5.2 试验机原理及总体技术方案

图 9－24（a）为对滚柱试样进行滚动接触疲劳试验，滚柱两端的钢轮在加载机构下对滚柱施加一定的应力，滚柱每旋转一圈，滚柱表面疲劳次数为 2 次，通过计算滚柱的转动次数，可以得出滚柱试样的疲劳寿命。

图 9－24（b）为对推力片试样进行滚动接触疲劳试验，被测样件置于最下方，固定不动，上方的平板以一定速度旋转并通过中间的滚珠将压力传递到下方被测平板上，若干个滚珠在上方平面的带动下在保持架内沿固定半径滚动，上方平板每转动一圈，每粒球对下方平板的疲劳次数为 0.5 次。因此，下方平板的疲劳次数与球的个数密切相关。

图 9－24（c）为对球试样进行滚动接触疲劳试验，被测球固定于夹具内，被夹具带动高速旋转，陪试球一般为 3 个或 4 个，在球腔同时对测试球施加一定速度，并以一定速度围绕测试球转动。

9.5.2.1 滚柱滚动接触疲劳试验机技术方案

滚柱滚动接触疲劳试验机主要用于对圆柱试样进行滚动接触疲劳测试，总体技术方案如图 9－25 所示。主要组成部分包括：基本试验系统（主机、动力源）以及计算机数据采集及处理系统。

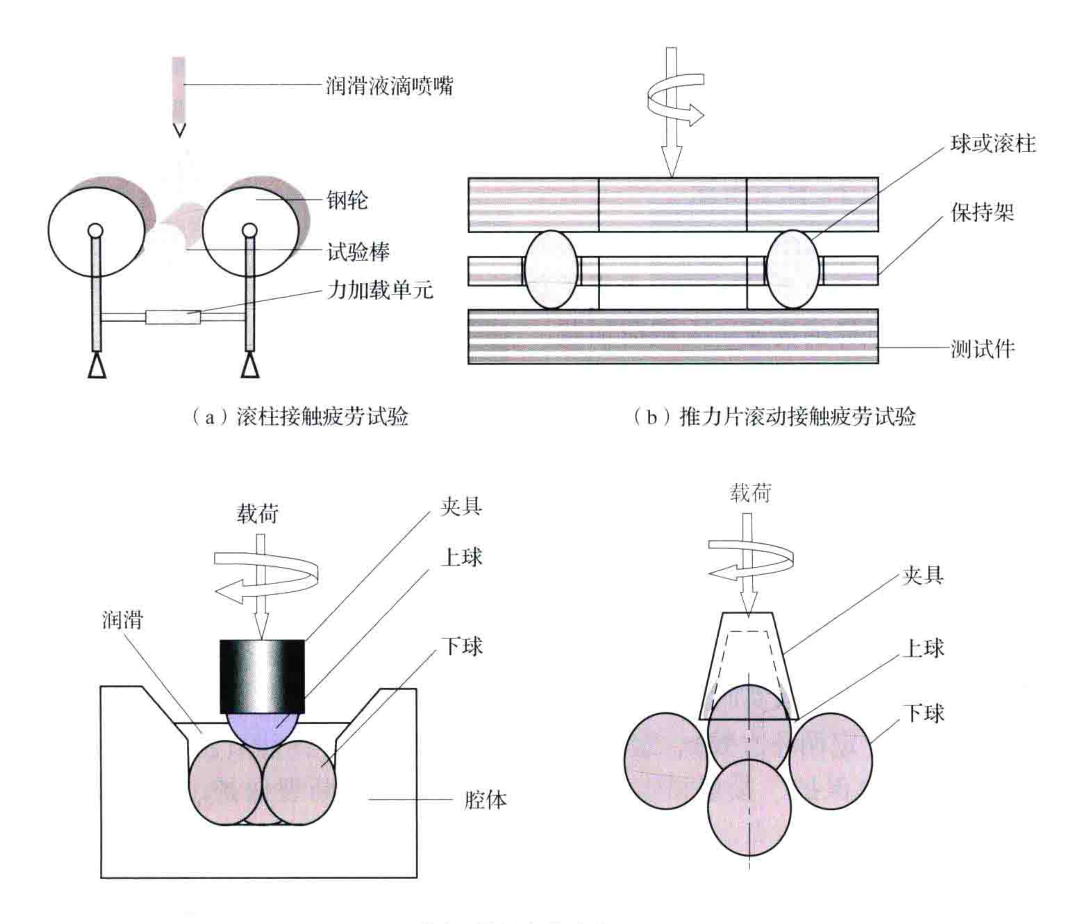


图 9－24　轴承元件滚动接触疲劳试验方法

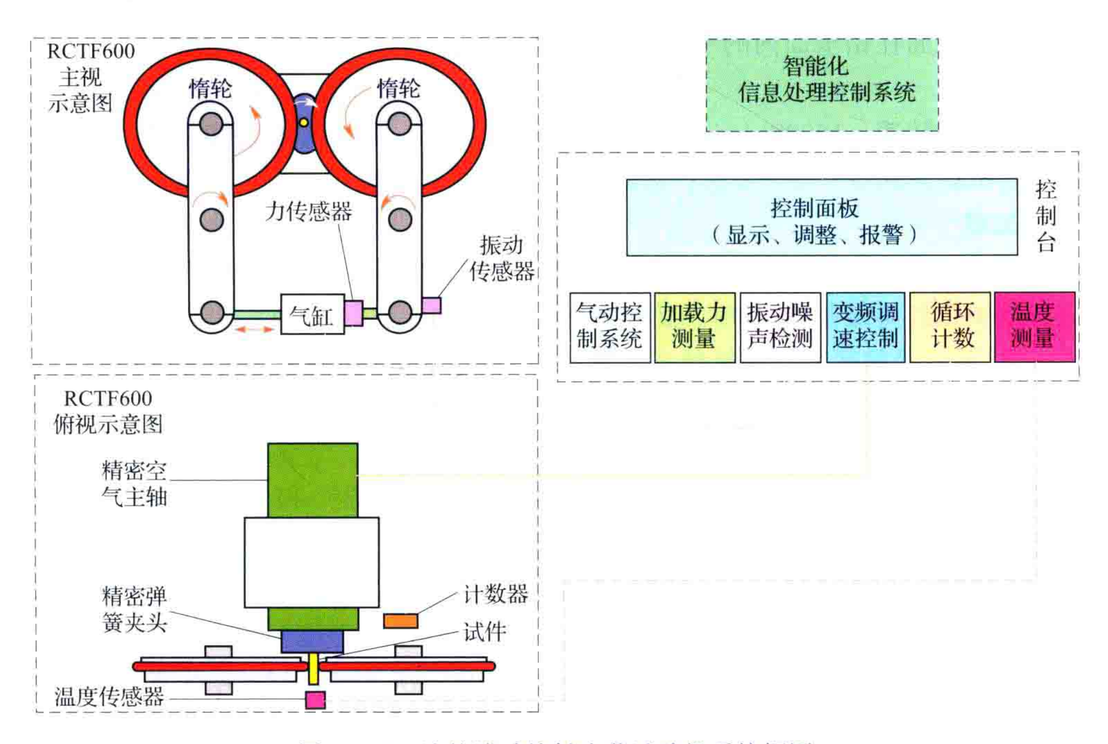


图 9－25　滚柱滚动接触疲劳试验机系统框图

从图 9－25 中可以看出，测试试样装于高速旋转轴上，两惰轮在气缸推力下对试样施加一定载荷，惰轮在摩擦力作用下随试样转动。试验用试棒直径为 ϕ10mm，设计惰轮直径 ϕ210mm，试棒设计转速 12000～15000r/min，所以惰轮转速为 575～715r/min，试样接触点加载应力可达 6GPa 甚至更高。

由于试样转速较高，更重要的是要采集滚柱试样疲劳后引起的振动信号，要求轴系本身的振动尽可能小，所以试棒回转轴采用了空气主轴。同时结合自适应加载机构，实现了对高强度圆柱滚子试样的高速、大载荷加载。

夹持试样的夹具采用了高精度弹簧夹头，更换试样方便快捷。

加力机构采用气缸加力，通过电－气压的调节控制机构可以对气缸压力进行自动调节，最大加力为 6000N，施加力的检测通过一测力传感器传回控制系统。

支点在中间，施加力、试棒着力点与支点的距离为 1:1，有利于力的检测及控制。

滚柱滚动接触疲劳试验机能达到的主要技术指标如下所述。

（1）试验机功能

①工作频率范围内，振幅测量分辨率：0.002mm；振动采样速率：100kHz。

②计算机控制具有参数实时显示功能、数据存储功能、数据报表及图示功能。

③可实现定时（定循环次数）、定振动幅值停机功能；

④具有电机过流保护、接触试验力上下限保护、试样断裂保护、超温保护停机功能。

（2）试验机机械精度

①试样端面和径向跳动：≤0.005mm。

②惰轮端面和径向跳动：≤0.01mm。

③试样轴与惰轮轴平行度：≤0.01mm。

④惰轮定位面在铅垂面内的平行度：≤0.01mm。

（3）电机

①电机最大转速：15000r/min，能实现多挡位调速，调速范围 5000～15000r/min。

②试验机转速精度：±1 周次；转数精度：0.1%。

（4）加载

①接触试验力的加载方式：气动力加载；加载力：6kN。实现载荷谱加载。

②静态加载载荷误差≤±1%，传感器精度：0.5%。

9.5.2.2 球滚动接触疲劳试验机技术方案

球－球接触疲劳试验机主要用于对圆球试样进行滚动接触疲劳测试，技术方案如图 9－26 所示。

球滚动接触疲劳试验机由基本试验系统（主机、动力源）和计算机智能电控系统组成，疲劳试验中，试验腔系统放置 3 或 4 个陪试球，在气缸加载系统的作用下上升，与上方装于承载主轴上的测试球接触；达到一定应力后，启动主轴电机，主轴高速旋转，实现钢球之间的交变应力滚动接触。试验过程中，智能化信息处理控制系统通过振动噪声监测系统、加载力测量控制系统、温度测量控制系统和旋转次数转速测量系统对设备运行参数进行检测和数据处理，实现设备在要求转速下按设定载荷谱运行，该载荷谱一般由发动机设计所根据轴承在飞行过程中所受载荷规律设计模拟。

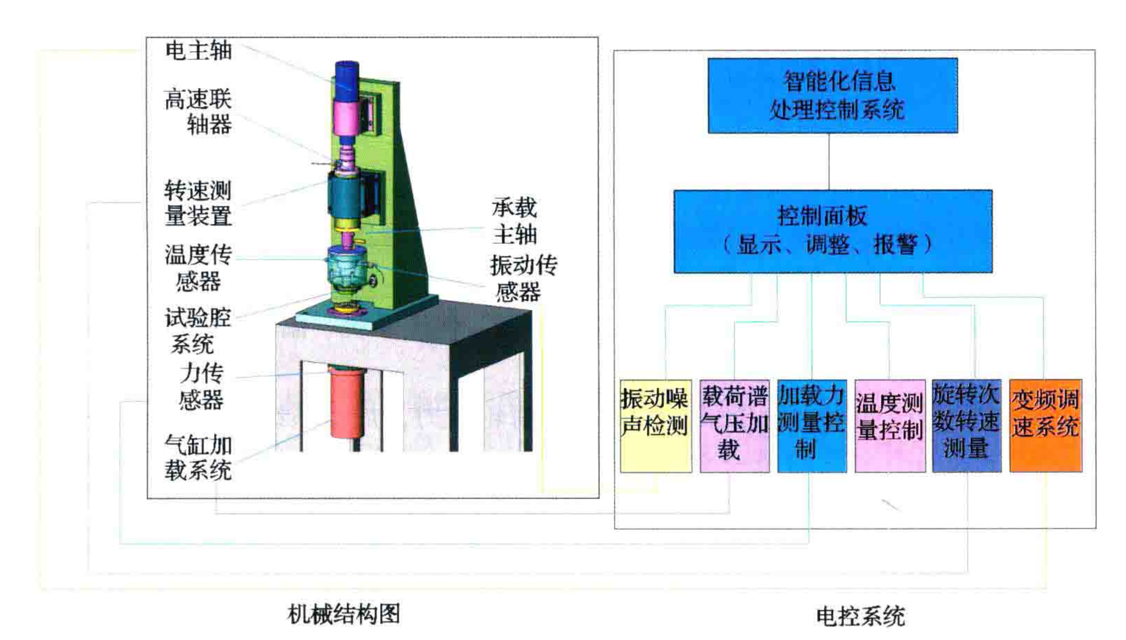


图9-26 球接触疲劳试验机系统框图

球滚动接触疲劳试验机主要技术指标如下：

（1）试验机功能

①工作频率范围内，振幅测量分辨率：0.002mm；振动采样速率：100kHz。

②计算机控制具有参数实时显示功能、数据存储功能、数据报表及图示功能。

③可实现定时（定循环次数）、定振动幅值停机功能；

④具有电机过流保护、接触试验力上下限保护、试样断裂保护、超温保护停机功能。

（2）试验机机械精度

①承载主轴轴向和径向跳动：≤0.008mm。

②试球水平和垂直方向跳动：≤0.01mm。

③导向轴端面与承载主轴的垂直度：≤0.03mm。

④导向轴与承载主轴同轴度：≤0.1mm。

（3）电机

①电机最大转速：10000r/min，能实现多挡位调速，调速范围500～10000r/min。

②试验机转速精度：±1周次；转速精度：0.1%。

（4）加载

①接触试验力的加载方式：气动力加载；加载力：10kN。实现载荷谱加载。

②静态加载载荷误差≤±1%；传感器精度：0.5%。

9.5.3 滚动接触疲劳试验机关键技术

滚柱接触疲劳试验机与钢球接触疲劳试验机是分别对轴承两种典型的滚动体滚柱和钢球进行接触疲劳寿命的测试，两种试验设备的测试原理相同，即滚动体运转经过一定循环次数后，由于接触疲劳会造成滚动体表面的局部微小剥落，因剥落形成的凹坑或裂纹在滚动体高速运转过程中与原始状态相比会使系统的运动状态发生改变，此时

利用振动传感器准确识别此信号，同时试验机记录滚动体发生剥落时运转的循环次数。

9.5.3.1 机械结构

滚柱接触疲劳试验机与钢球接触疲劳试验机的总体机械结构示意图如图 9－25 和图 9－26所示。其中滚柱接触疲劳试验机主要包括精密空气静压电主轴、配试惰轮、加载气缸、各类传感器（测力、测振、测温、测速等）、底座等。钢球接触疲劳试验机主要包括承载主轴、驱动主轴、试验腔系统、气缸加载系统、测速系统、温度及振动测试系统、底座等。

对于滚柱疲劳试验机，由于采用了对称双惰轮加力，加力系统采用自适应机构，保证滚柱试件试验时所承受的是一对大小相等、方向相反的作用力，而滚柱转动主轴不会受到任何外力作用。根据上述特点，滚柱疲劳试验机的主轴采用了空气静压主轴，具有精度高、振动小等特点，对试验过程中由于疲劳缺陷引起的系统振动或噪声信号敏感度高。

对于球疲劳试验机，由于试验球直径较大（ϕ22.225mm），经计算在接触应力 6GPa 的条件下，承载主轴需承载近 7000N 的轴向力，所以结构设计时将承载主轴与驱动主轴分离，保证了设备运行的可靠性。承载主轴需要在高轴向载荷下具有比被试验件更高的使用寿命，设计的承载主轴如图 9－27 所示：主轴上端采用一套串联轴承，提高主轴的轴向承载能力，下端采用一套背对背角接触球轴承，保证主轴的回转精度，通过精密制造及高速动平衡技术保证主轴高速运转下的稳定性。

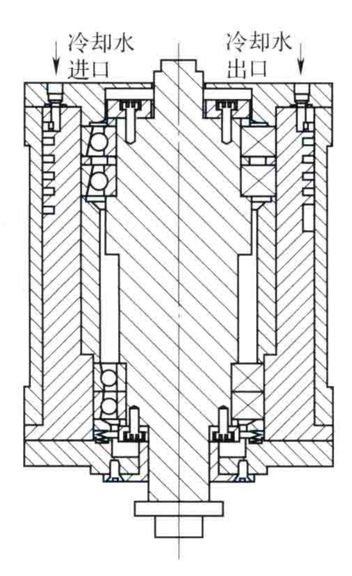


图 9－27 承载主轴结构示意图

疲劳试验机需要按照设定的载荷谱进行加载，加力机构均采用气缸来实现。与油缸加载相比，气缸加载稳定性更强，发热远低于油缸加载，而且系统结构更加紧凑。通过比例阀调节控制气体压力从而调节加载力，力的大小通过置于气缸上的球头形测力传感器进行检测，该力传感器具有万向结构，保障了检测力的准确性。

为了疲劳试验方便，惰轮及试验滚柱均采用可更换设计，滚柱采用精密弹簧夹头夹紧，便于更换不同尺寸的试件；球试验腔系统也采用了可更换设计，即通过改变测试球夹具和轨道腔体尺寸大小，可以实现对不同大小钢球进行不同状态下的滚动接触接触疲劳试验。

9.5.3.2 电控系统

电控系统负责控制疲劳试验机的运行及试验，对疲劳试验中的各项参数进行采集和数据处理，根据反馈的这些状态信息对疲劳试验机做出状态判断及下一步的控制；而且其可以根据反馈的振动信号判断测试球是否出现疲劳。其中信号采集及处理系统是疲劳试验机电控系统的关键。

信号采集处理系统主要是对传感器采集的信号进行滤波处理，将信号中的噪声滤除，从而得到正确有效的信号。由于在振动检测中，信号不可避免受到各种背景噪声的干扰，

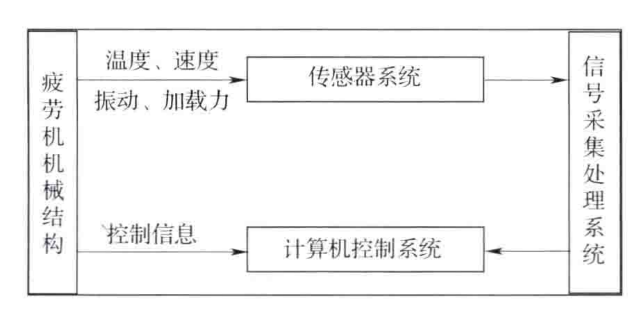


图9－28　电控系统示意图

最大难点为如何捕捉试样疲劳失效时产生的微弱振动信号。而且试验机被测振动信号的频率随主轴旋转速度变化而不断改变，提取准确的疲劳振动信号需要能够适应并跟踪旋转速度。因此试验机采用跟踪滤波技术，实现信号自适应滤波，获得精确的振动波形，用于疲劳状态的判断。

（1）跟踪滤波器设计

跟踪滤波器主要实现两个功能：一是窄带滤波，把中心频率上下很窄范围频段的信息保留，其他频段的信息滤除，该方式可以有效去除大量的背景噪声，而特征信息则能够有效保留；另一方面是实现跟踪，即当旋转速度发生变化时，中心频率随着转速的变化而调整，实现对特征频带的跟踪。

跟踪滤波器是一种有源滤波器。一般有源滤波器由运放、电阻、电容组成，实现低通、高通、带通、带阻或全通滤波，根据需要的特征参数和频率响应，设计相应的滤波电路。对于带通滤波而言，其中心频率、带宽及增益等参数不会随系统运行状态的改变而变化。

为了实现跟踪滤波，需要采用开关电容滤波器。开关电容滤波器频响特性随采样频率的变化而改变，通过控制采样频率，可以实现跟踪滤波。

从跟踪滤波器的特性可知，实现跟踪滤波需要获得振动信号和频率信号。疲劳试验机通过光电计数/转速器获得试件的转速，通过锁相倍频得到跟踪的中心频率；然后采用高灵敏度的加速度传感器获取振动信号。试验机的转速范围为600～15000r/min，频率为10～250Hz，测量原理框图如图9－29所示。

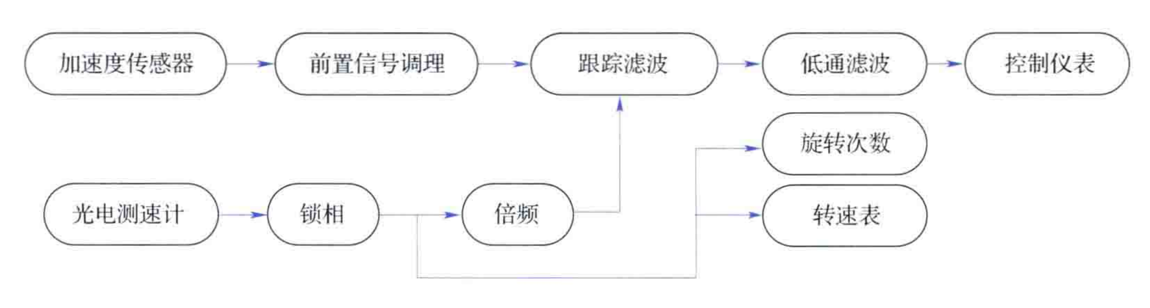


图9－29　跟踪滤波原理框图

（2）跟踪滤波器的实现

跟踪滤波器设计采用开关电容滤波芯片MF10，该芯片包括两个独立的滤波器模块，均可构成二阶或一阶的滤波器电路，两个模块级联起来可实现高达四阶的滤波器，随着输入信号加入的位置的不同，在第一级加法器相加的信号的不同，内部开关的位置不同，构

成的滤波器电路可以有多种模式。图 9－30 为开关电容滤波芯片 MF10 滤波器模块结构，试验机采用 MF10 实现一个二阶带通滤波器，随着转速的变化，带通的中心频率相应改变，实现跟踪滤波。

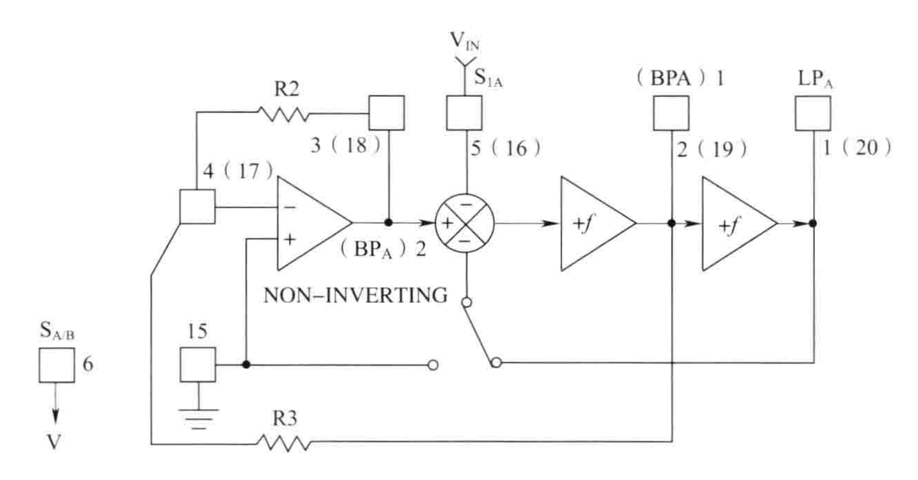


图 9－30　开关电容滤波芯片 MF10 滤波器模块结构

由于开关电容滤波芯片需要 50% 占空比的方波信号，转速信号进入双单稳态多谐振荡器 CD4528，经过整形之后变为方波信号，再进入 CD4046 锁相环电路。然后，再输入 CD4518 级联构成的双十进制计数器，即 100 倍频之后再返回到 CD4046。因此，从 CD4046 的 4 脚可以输出 100 倍频的方波信号作为 MF10 的时钟信号。经过 100 倍频之后，方波频率 $f_{CLK} = f_0 \times 100$，然后进入 MF10 的 10，11 脚时钟端。对于 MF10，由于之前选择的带通中心频率 $f_0 = f_{CLK}/100$，所以滤波之后的信号中心频率等于送入信号的频率，使得带通滤波器的中心频率 f_0 始终跟踪输入信号频率的变化。图 9－31 为所述跟踪滤波电路简图。

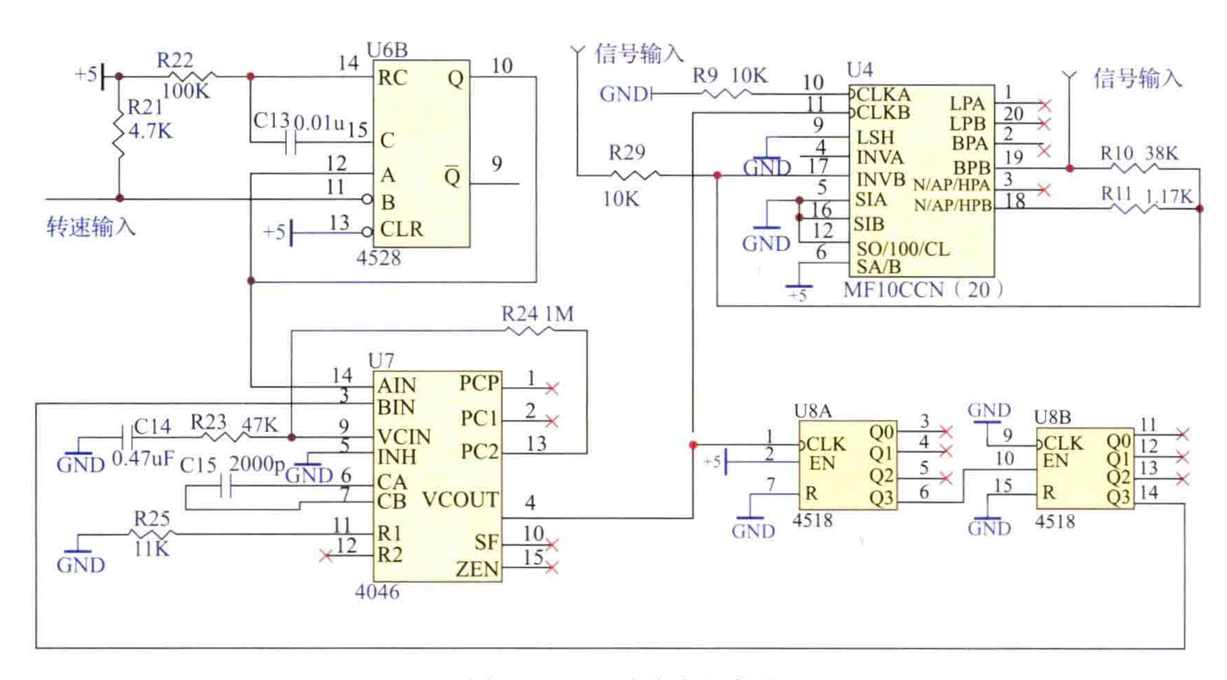


图 9－31　跟踪滤波电路图

滤波后，需要进行绝对值计算，对交流信号进行整流；然后再进行 Sallen - Key 二阶低通滤波，把振动信号转化为直流电压信号，显示为振动量（单位为 μm），供如图 9 - 32 所示的电控柜进行采集、显示、测量和控制，作为航空发动机轴承滚动接触疲劳状态的判断依据。

试验机跟踪滤波系统搭建完毕后，通过如图 9 - 32 所示的计算机系统对滤波前后的信号进行采集对比。系统通过变频器驱动电机以 2200r/s 的实验速度旋转，图 9 - 33（a）为滤波前测得的振动信号，其中包含大量变频器对电源污染引起的干扰。图 9 - 33（b）为经过跟踪滤波获得的振动信号，可以看出设计的自动跟踪滤波器效果还是相当理想的。图 9 - 34 为疲劳试验机的控制面板及软件操作界面。



图 9 - 32　试验机电控柜

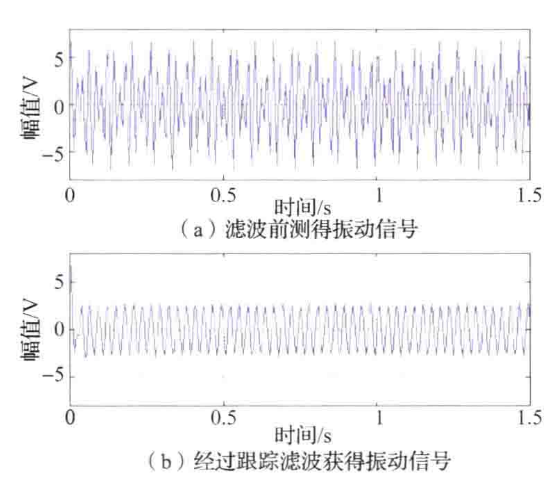


图 9 - 33　滤波前后对比

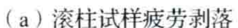


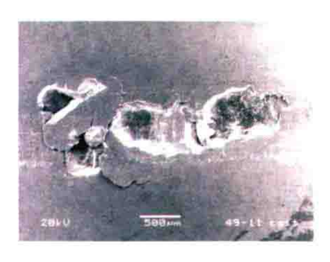
图 9 - 34　疲劳试验机的控制面板及软件操作界面

本节介绍的滚动接触疲劳试验机系统通过对高速旋转的圆柱形以及圆球形试件进行精密接触位置和加载压力控制，能快速、高效、低成本地完成试件表面确定区域、给定循环周期下的疲劳效果试验；通过精心设计和精密制造，尽可能地降低试验系统本体噪声水平和尽可能地区隔实验系统本体噪声频谱与试件疲劳损伤特征信号频谱，使试验系统具有高灵敏度的疲劳损伤检测能力。当试件疲劳损伤达到给定门限时，试验系统能自动中止试验进程，并显示相关信息和给出提示报警信号。

图 9 - 35 为滚柱试样和球试样经过滚动接触疲劳试验后产生疲劳剥落后的照片，经过试验验证当试样剥落面积小于 $1mm^2$ 时设备就能及时判断报警，从而满足了疲劳试验的要求。




（a）滚柱试样疲劳剥落


（b）疲劳剥落坑微观形貌



（c）球试样疲劳剥落

图 9-35　试样疲劳剥落后图片

滚动接触疲劳测试试验设备实现了在高转速、大载荷条件下对轴承滚动体的接触疲劳寿命测试，为我国航空发动机轴承及其高速铁路、风电等高档轴承的基础研究和材料工艺选用打下了良好的基础，为全面取代进口轴承提供寿命测试依据。

参 考 文 献

[1] 梁迎春. 超精密机床研究现状与展望 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014 (5).

[2] 郭东明. 高性能精密制造方法及其研究进展 [J]. 机械工程学报, 2014 (6).

[3] 张建明. 超精密加工机床系统研究与未来发展 [J]. 航空制造技术, 2014 (6).

[4] 杨辉. 高效、极致——精密超精密加工技术的发展与展望 [J]. 航空制造技术, 2014.

[5] 杨辉. 超精密加工设备的发展与展望 [J]. 航空制造技术, 2008 (24).

[6] 张建明. 现代超精密加工技术和装备的研究和发展 [J]. 航空精密制造技术. 2008 (2).

[7] 袁巨龙. 超精密加工领域科学技术发展研究 [J]. 机械工程学报, 2010 (8).

[8] 李敏. 复杂曲面零件超精密加工方法的研究进展 [J]. 机械工程学报, 2015 (3)

[9] 殷国富. 面向现代制造的先进测试技术及其发展趋势 [J]. 中国测试, 2010 (1).

[10] 郭攀成. 现代抗疲劳制造应用技术研究与发展 [J]. 兰州工业高等专科学校学报, 2011 (6).

[11] 任违. 超精密车削中精确对刀方法 [J]. 机床与液压, 2010 (8): 第 38 卷第 16 期.

[12] 杨力. 大型非球面反射镜的柔性光学制造技术 [J]. 光学技术, 2001 (11): 第 27 卷第 6 期.

[13] 计时鸣. 气囊抛光技术及其研究现状 [J]. 机电工程, 2010 (5).

[14] 张伟. 光学元件超精密气囊抛光关键技术研究现状 [J]. 光学学报, 2009 (1).

[15] 彭小强. 确定性磁流变抛光的关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.

[16] 秦北志. 光学元件精密加工中的磁流变抛光技术工艺参数 [J]. 强激光与粒子束, 2013 (9).

[17] 尤伟伟. 磁流变抛光的关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.

[18] 杨福兴. KDP 晶体超精密加工技术的研究 [J]. 制造技术与机床, 2003 (9).

[19] 关佳亮. KDP 晶体单点金刚石超精密切削加工的发展 [J]. 现代制造工程, 2012 (8).

[20] 王景贺. KDP 晶体光学零件超精密加工技术研究的新进展 [J]. 工具技术, 2004 (38).

[21] 洑运. 黑色金属的金刚石精密切削技术研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2007.

[22] 李占杰. 超精密切削黑色金属的工艺及机理研究 [D]. 天津大学, 2013.

[23] A. Pramanik. Ultra - precision turning of electroless - nickel: Effect of phosphorus contents, depth - of - cut and rake angle [J] Journal of Materials Processing Technology, 2008.

[24] A. Pramanik. Cutting performance of diamond tools during ultra – precision turning of electroless – nickel plated die materials [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003 (140).

[25] Carr J. W. Apparatus and method for atmospheric pressure reactive atom plasma processing for shaping of damage free surfaces: United States, 7510664 [P]. 2009 – 03 – 31.

[26] Fiske P, Verma Y, Chang A, et al. Reactive atom plasma processing for lightweight SiC mirrors [C] //OSA Technical Digest. Rochester: Optical Society of America, 2006: OFMB1.

[27] Subrahmanyan P. K, Gardopée G. Reactive atom plasma (RAP) processing of mirrors for astronomy [C] //Proceedings of SPIE 7018. Marseille: SPIE, 2008: 701809.

[28] Castelli M, Jourdain R, Morantz P, et al. Fast figuring of large optics by reactive atom plasma [C] //Proceedings of SPIE 8450. Amsterdam: SPIE, 2012: 845034.

[29] Castelli M, Jourdain R, Morantz P, et al. Rapid optical surface figuring using reactive atom plasma [J]. Precision Engineering, 2012, 36: 467 – 476.

[30] Subrahmanyan P. Rapid Fabrication of lightweight SiC mirrors using RAP™ processing [R]. Livermore: RAPT Industries Inc., 2006.

[31] Subrahmanyan P, Gardopee G, Verma Y, et al. Rapid fabrication of lightweight SiC aspheres using reactive atom plasma (RAP) processing [C] //Proceedings of SPIE 6666. San Diego: SPIE, 2007: 66660A.

[32] Subrahmanyan P, Gardopee G, Fiske P S, et al. Reactive atom plasma (RAP™) processing of optical surfaces [R]. Livermore: RAPT Industries Inc., 2006.

[33] Mori Y, Yamamura K, Yamauchi K, et al. Plasma CVM (chemical vaporization machining): an ultra precision machining technique using high – pressure reactive plasma [J]. Nanotechnology, 1993, 4: 225 – 229.

[34] Yamamura K, Sano Y, Shibahara M, et al. Ultraprecision machining utilizing numerically controlled scanning of localized atmospheric pressure plasma [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45 (10B): 8270 – 8276.

[35] Mori Y, Yamauchi K, Yamamura K, et al. Fabrication technology of hard x – ray aspherical mirror optics and application to nanospectroscopy [C] //Proceedings of SPIE 5193. San Diego: SPIE, 2004: 11 – 17.

[36] Yamamura K, Mimura H, Yamauchi K, et al. Aspheric surface fabrication in nm – level accuracy by numerically controlled plasma chemical vaporization machining (CVM) and elastic emission machining (EEM) [C] //Proceedings of SPIE 4782. Seattle: SPIE, 2002: 265 – 270.

[37] Mori Y, Yamauchi Y, Yamamura K, et al. Development of plasma chemical vaporization machining and elastic emission machining systems for coherent X – ray optics [C] //Proceedings of SPIE 4501. San Diego: SPIE, 2001: 30 – 42.

[38] Takino H, Shibata N, Itoh H, et al. Computer numerically controlled plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode for optical fabrication [J]. Applied Optics,

1998, 37 (22): 5198 -5210.

[39] Takino H, Shibata N, Itoh H, et al. Fabrication of small complex - shaped optics by plasma chemical vaporization machining with a microelectrode [J]. Applied Optics, 2006, 45 (23): 5897 -5902.

[40] Takino H, Shibata N, Itoh H, et al. Fabrication of optics by use of plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode [J]. Applied Optics, 2002, 41 (19): 3971 - 3977.

[41] Arnold T, Boehm G, Eichentopf I M, et al. Plasma jet machining [J]. Vakuum in Forschung und Praxis, 2010, 22 (4): 10 -16.

[42] Arnold T, Boehm G, Paetzelt H. New freeform manufacturing chain based on atmospheric plasma jet machining [C] // OSA Technical Digest. Arlington: Optical Society of America, 2015: FTh1B. 3.

[43] Schindler A. Tutorial on recent advances in ion beam and plasma jet processing [C] // OSA Technical Digest. Monterey: Optical Society of America, 2012: OW4D. 1.

[44] Arnold T, Böhm G, Paetzelt H. Ultra - precision surface machining with reactive plasma jets [J]. Contributions to Plasma Physics, 2014, 54 (2): 145 -154.

[45] Arnold T, Meister J, Böhm G. Atmospheric plasma jet machining: simulation of spatio -temporal substrate surface temperature distributions [C] //OSA Technical Digest. Rochester: Optical Society of America, 2008: OThD2.

[46] K. Yamamura, S. Shimada, Y. Mori. Damage -free Improvement of Thickness Uniformity of Quartz Crystal Wafer by Plasma Chemical Vaporization Machining [J]. CIRP Annals Manufacturing Technology 57 (2008): 567 -570.

[47] Peter S. Fiske, Yogesh Verma, Andrew Chang, Nick Lyford, Jude Kelley, Phil Sommer, Ning Li, Kurt Pang, George Gardopee, Tom Kyler and John Berrett. Reactive Atom Plasma Processing forLightweight SiC Mirrors [J]. OCIS codes: (220. 4610) Optical fabrication; (220. 5450) Polishing

[48] Pradeep Subrahmanyan, George Gardopee, Yogesh Verma, Ning Li, Tom Yu, Thomas Kyler, Peter Fiske, Philip Sommer. Rapid fabrication of lightweight SiC aspheres using reactive atomplasma (RAP™) processing [J]. Proc. of SPIE, 2007, 6

[49] Peter S. Fiske, Yogesh Verma, Andrew Chang, et al. Reactive Atom Plasma Processing for Lightweight SiC Mirrors. OFT, 2006, 10

[50] M. Castelli, R. Jourdain, P. Morantz, P. Shore. Rapid optical surface figuring using reactive atom plasma [J]. Precision Engineering 36 (2012) 467 -476

[51] G. Böhm, I. -M. Eichentopf, T. Arnold. Atmospheric Plasma Jet Machining of Optical Surfaces [C]. Optical Fabrication and Testing, 2008.

[52] T. Arnold, G. Boehm, I. M. Eichentopf, et al. Plasma Jet Machining [J]. Vakuum in Forschung und Praxis, 2010 (22): 10 -16.

[53] M. Castelli, R. Jourdain, P. Morantz, P. Shore. Rapid optical surface figuring using reactive atom plasma [J]. Precision Engineering 2012, (36), 467 -476

[54] 张谷令，敖玲，胡建芳，等. 应用等离子体物理学 [M]. 北京：首都师范大学出版社，2008：191 -193.

[55] Orlando Auciello，Daniel L. Flamm. 等离子体诊断 [M]. 北京：电子工业出版社，1994：371 -372.

[56] William John O′Brien. Characterisation and Materrial Removal Properties of the RAPTM Process [D]. Cranfield：Cranfield University PhD thesis，2011：16 -18.

[57] J. R.，罗思. 工业等离子体工程 [M]. 北京：科学出版社，1998：272 -276.

[58] 辛仁轩. 等离子体发射光谱分析 [M]. 北京：化学工业出版社，2011：14 -16.

[59] Maher I · Boulos，感应耦合射频等离子体 [J]. Pure &Appl. Chem.，1985，9 (57)：259 -285.

[60] 管井秀朗. 等离子体电子工程学 [M]. 北京：科学出版社，2005：2 -4.

[61] 陈新坤. 关于电感耦合等离子体光谱法激发机理的几个问题 [J]. 光谱学与光谱分析，1984，4 (5)：34 -39.

[62] 黄鑫泉. 关于电感耦合等离子体激发机理的讨论述评 [J]. 化工冶金，1989，10 (2)：72 -79.

[63] 傅宏郎. 关于电感藕合等离子体辐射和温度的研究 [J]. 1994 -2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. http：//www. cnki. net

[64] D. Bernardi，V. Colombo，E. Ghedini，A. Mentrelli. Three -dimensional modeling of inductivelycoupled plasma torches [J]. Pure Appl. Chem.，Vol. 77，No. 2，pp. 359 -372，2005.

[65] Klubnikin，V. S.，Teplofiz Vys. Thermal and gas -dynamic characteristics of an induction discharge in an argon flux [J]. THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNALD，1975，13：439 -473.

[66] Lesinski. J，Gagne. R.，M. I. Boulos. Gas and particle velocity measurements in an induction plasma [J]. 5th International Symposium on Plasma Chemistry，Edinburgh，U. K.，1981，2 (527)：10 -14.

[67] Vittorio Colombo，Emanuele Ghedini，Javad Mostaghimi. Three -Dimensional Modelingofan In ductively Coupled Plasma Torchfor Spectroscopic Analysis [J]. IEEE TRANSACTION SONPLASMA SCIENCE，2008，4 (36)：1040 -1041.

[68] 贾世奎. 超光滑玻璃表面粗糙度测量结果研究 [J]. 测试与校准，2007，27 (1)：20 ~33.

[69] 魏康成. 扫描电镜技术在木材工业中的应用 [J]. 林业机械与木工设备，2013，41 (1)：47 ~49.

[70] 柯以侃. 分析化学手册（第二版）第三分册：光谱分析 [M]. 北京：化学工业出版社，2001：39 ~84.

[71] 田园. 光学表面等离子体加工机理研究 [D]. 西安：西安工业大学，2010：35 -39.

[72] C. J. Mogab，Flamm. Plasma etching of Si and SiO2—The effect of oxygen additions to CF4plasmas [J]. J. Appl. Phys. 49，3796 (1978)

[73] 迈克尔. 等离子体放电原理与材料处理 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 440 - 470.
[74] Thomas Arnold, Georg Boehm, Inga - Maria Eichentopf, Manuela Janietz, Johannes Meister, Axel Schindler. Plasma Jet Machining [J]. www. vip - journal. de, 2010, 22 (4): 10 - 16.
[75] C. J. Mogab, A. C. Adams, D. L. Flamm. Plasma etching of Si and SiO2—The effect of oxygen additions to CF_4plasmas [J]. J. Appl. Phys. 49, 3796 (1978).
[76] 伍艺龙. 等离子体抛光机理的研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2011: 44 - 56.
[77] HenriJansen, HanGardeniers, MeintdeBoer, MikoElwenspoekandJanFluitman. Asurvey on the reactive ionetching of silicon in microtechnology [J]. J. Micromech. Microeng. 6 (1996) 14 - 28.
[78] K. Yamamura, Study on Chemical Figuring and Finishing of Sintered SiC Substrate Using Atmospheric Pressure Plasma [J]. Procedia CIRP, 2012, 3: 335 - 339.
[79] Inga - MariaEichentopf, Reactive Plasma Jet High - Rate Etching of SiC [J]. Plasma Processes and Polymers, 2009, 6: 204 - 208.
[80] Thomas Arnold, Application of atmospheric plasma jet machining (PJM) for effective surface of SiC [J]. Precision Engineering, 2012.
[81] Inga - Maria Eichentopf. Etching mechanisms during plasma jet machining of silicon carbide [J]. Surface & Coatings Technology, 205 (2011): 430 - 434.
[82] 王新亮. 超疏水表面滑移理论及其减阻应用研究进展 [J]. 力学进展, 2010 (40), 3.
[83] 叶霞. 超疏水光栅微结构表面减阻试验研究 [J]. 中国机械工程, 2007 (12) 18: 23.
[84] 张梅. 低表面能涂层在飞机防除冰领域的研究进展与应用 [J]. 现代涂料与涂装, 2010 (9).
[85] 姜涛. 飞秒激光加工微结构及其系统研究进展 [J]. 制造技术与机床, 2014 (5).
[86] 李荣彬. 光学微结构的超精密加工技术 [J]. 纳米技术与精密工程, 2003 (12).
[87] 杜凯. 国家点火装置 (NIF) 点火靶制备技术研究进展 [J]. 物理, 2009 (12).
[88] 宣益民. 基于微结构的光谱特征控制技术 [J]. 红外与激光工程, 2009 (2).
[89] 徐宗伟. 聚焦离子束加工单晶体金刚石刀具实验研究 [J]. 纳米技术与精密工程, 2014 (11).
[90] 赵清亮. 微结构光学功能元件模具的超精密磨削加工技术 [J]. 机械工程学报, 2011 (11).
[91] 李荣彬. 微结构自由曲面的超精密单点金刚石 [J]. 机械工程学报, 2013 (10).
[92] 封贝贝. 亚音速飞行器壁面沟槽减阻研究与应用 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2012 (52) 7.
[93] 范占斌. 圆柱表面微结构阵列超精密车削加工技术 [J]. 纳米技术与精密工程, 2014 (9).
[94] 陈远流. 面向微结构阵列的超精密切削加工与测量关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江

大学，2014.
[95] 周广福. 基于飞秒激光的光纤微加工基础研究 [D] 武汉理工大学，2013.
[96] 周京博. 非回转对称微结构表面超精车削轨迹生成及形状误差评价 [D] 哈尔滨工业大学，2013.
[97] 周正阳. 表面微结构减阻的机理研究与优化设计 [D] 上海交通大学，2013.
[98] 郑淼焱. 材料表面微纳结构的制备及其研究进展 [J]. 材料热处理技术，2011（40）24.
[99] 包琼琼. 关于自由光学曲面的超精密慢刀伺服车削技术研究 [J]. 现代制造工程，2013（11）.
[100] Chun - Chieh Chen. Slow Tool Servo Diamond Turning of Optical Freeform Surface for Astigmatic Contact Lens [C], Proc. of SPIE Vol. 8126
[101] Yazid Tohme. Trends in Ultra Precision Machining of Freeform Optical Surfaces [J]. 2008 OSA/Solar 2008.
[102] 铁贵鹏. 自由曲面光学元件慢刀伺服加工关键技术研究 [D] 长沙：国防科学技术大学，2009（11）.
[103] 徐兵. 光学自由曲面超精密加工方法综述 [J] 现代制造工程，2014（3）.
[104] 张新. 光学自由曲面的检测方法 [J] 中国光学与应用光学，2008（12）.
[105] 徐兵. 光学自由曲面快速刀具伺服加工技术的研究进展 [J] 制造业自动化，2013（11）.
[106] 李荣彬. 自由曲面光学的超精密加工技术及其应用 [J] 红外与激光工程，2010（2）.
[107] 李荣彬. 自由曲面光学元件的设计、加工及面形测量的集成制造技术 [J] 机械工程学报，2010（6）.
[108] 蒋金波. 汽车照明系统的设计及超精密自由曲面加工技术 [J] 照明工程学报，2008（9）.
[109] 俞学兰. 航空发动机压气机叶片型面检测技术 [J] 航空制造技术，2007（11）.
[110] 刘祚时. 三坐标测量机（CMM）的现状和发展趋势 [J]. 机械制造，2004，42（480）：32 - 34.
[111] 蔺小军. 航空发动机叶片型面三坐标测量机测量技术 [J]. 计算机集成制造系统，2012，18（1）：125 - 131.
[112] 王军. 航空发动机叶片三维轮廓测量方法研究：[D]. 北京：中国科学研研究生院，2005.
[113] 郭旗. 三坐标测量机在汽轮机叶片测量中的应用 [J]. 数字技术与应用，2012，（12）：80.
[114] 吴志新. 非接触式白光测量机在叶片检测中的研究与应用 [J]. 航空制造技术，2014，（13）：48 - 51.
[115] 孙青州. 叶片复杂曲面测量系统研究：[D]. 长春：吉林大学，2014.
[116] 孟书广. 航空发动机复杂零部件的新型测量技术 [J]. 航空制造技术，2014，（13）：32 - 35.

[117] 陆佳艳. 航空发动机叶片型面测量方法评述 [J]. 计测技术, 2009, 29 (3): 1 -3.

[118] 王淼安. 光学测头在飞机发动机叶片检测中的应用 [J]. 航空制造技术, 2010, (13): 32 -33.

[119] 王晓嘉. 高隽, 王磊. 激光三角法综述 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25 (4): 601 -604.

[120] 秦大辉. 4 轴 3D 激光测量系统中旋转工作台参数标定 [J]. 华中科技大学学报, 2009, 37 (6): 129 -132.

[121] 冯杭. 基于两轴数控转台的多视测量数据拼合 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31 (2): 244 -249.

[122] 徐永安. 激光旋转扫描测量系统中转轴标定及多视拼合 [J]. 中国激光, 2005, 32 (5): 659 -662.

[123] 胡民政. 两轴转台结构光三维扫描仪及多视自动拼合 [J]. 测试技术学报, 2010, 24 (2): 161 -169.

[124] 解则晓. 四轴自由曲面非接触测量系统 [J]. 航空精密制造技术, 2002, 38 (1): 31 -33.

[125] 徐永安. 转台中心轴线标定误差分析与修正 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31 (8): 899 -903.

[126] 庄葆华. 高精度激光三角法位移测量被测表面倾斜影响研究 [J]. 计量技术, 1996, (2): 2 -4.

[127] 徐玉春. 被测表面特征对激光测头特性的影响 [J]. 天津大学学报, 2001, 34 (6): 796 -799.

[128] 吴剑锋. 激光三角法测量误差分析与精度提高研究 [J]. 机电工程, 2003, 20 (5): 89 -91.

[129] 闫航瑞. 表面倾斜对激光三角测量的影响及校正研究 [J]. 光学仪器, 2014, 36 (1): 11 -14.

[130] Shiou F. J. Intermittent Process Measurement of a Freeform Surface Profile with a Circular Triangulation Laser Probe on a Machining Centre [J]. The internation Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, (21): 365 -376.

[131] Nikola V. The influence of incident angle, object colcour and distance on CNC laser scanning [J]. The internation Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50 (1 -4): 265 -274.

[132] 房佳威. 非接触激光测头测量轴线标定系统 [J]. 制造技术与机床, 2006, (9): 92 -94.

[133] 卢科青. 点激光测头激光束方向标定 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18 (4): 880 -886.

[134] 刘勇. 光学测头光束方向平面标定法的研究与应用 [J]. 测控技术, 2013, 32 (增刊): 513 -515.

[135] 解则晓. 利用测头等效法确定激光单点测头的方向 [J]. 光电工程, 2005, 32 (5): 46 -49.

[136] 房建国. 一种点投射光学测头空间位置矢量的测量标定方法：中国，G01B11/00 (2006. 01)，201310493454 [P]. 2014-01-22.
[137] 赵振业. 高强度合金应用与抗疲劳制造 [J]. 功能材料（增刊），2008 (39).
[138] 赵振业. 高强度合金抗疲劳应用技术研究与发展 [J]. 中国工程科学，2005 (3).
[139] 赵振业. 高强度合金应用与抗疲劳制造技术 [J]. 航空制造技术，2007 (10).
[140] 高玉魁. 表面强化改性工艺技术的挑战与发展机遇 [J]. 材料与保护（增刊），2008 (10).
[141] 赵显华. 豪克能^{PT}技术在航空抗疲劳制造中的应用 [J]. 航空制造技术，2012 (11).

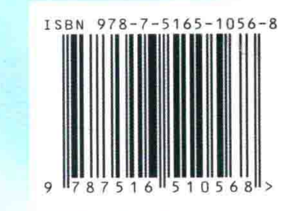
责任编辑：郭倩旎

责任设计：王　楠



杨辉，北京航空精密机械研究所研究员，中航工业精密超精密及微细加工技术首席专家，国务院"政府特殊津贴"获得者。1999 年毕业于哈尔滨工业大学机械制造及自动化专业获博士学位。长期从事武器装备国防预研及应用技术研究，主要研究方向为精密超精密加工设备及工艺、微纳制造技术，已发表学术论文 80 余篇，申请及授权发明专利 10 余项，获省部级科学技术进步奖 10 余项，培养硕士研究生 15 名。荣立中航工业集团公司个人二等功 1 次、三等功 2 次，并获"航空报国优秀贡献奖"等荣誉。

中航出版传媒有限责任公司
CHINA AVIATION PUBLISHING & MEDIA CO., LTD.
www.aviationnow.com.cn



ISBN 978-7-5165-1056-8

定价：180.00 元

[General Information]
书名=精密超精密加工技术新进展
作者=杨辉著
页数=450
SS号=14169153
DX号=
出版日期=2016.08
出版社=航空工业出版社